

THÈSE

présentée à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

pour obtenir le grade de
DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Claude MAEDER

Ingénieur EN.S.E.M. — Licencié ès. Sciences

SUJET

**Contribution à l'étude
du chauffage de lingots dans un four Pit**

Soutenue le 9 Décembre 1969 devant la commission d'examen

Membres du Jury :

Président	M. J. AUBRY
Examineurs	MM. A. CHARLES
	J. GOSSE
	Y. PUJOL
	C. ROSIER Invité



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551920_0013

THÈSE

présentée à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

pour obtenir le grade de
DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Claude MAEDER

Ingénieur E.N.S.E.M. — Licencié.ès.Sciences

SUJET

**Contribution à l'étude
du chauffage de lingots dans un four Pit**

Soutenue le 9 Décembre 1969 devant la commission d'examen

Membres du Jury :

Président : **M. J. AUBRY**
Examineurs : **MM. A. CHARLES**
J. GOSSE
Y. PUJOL
C. ROSIER Invité

THÈSE

présentée à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE WANG

pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

par

CLAUDE MABON

INGÉNIEUR EN CHEMIE - DIPLÔMÉ DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE CHIMIE

1913

Contribution à l'étude

du comportement des liquides dans les tubes capillaires



Reçu le 5 Décembre 1913 avant la remise de la thèse

W. J. ROBERT
M. A. CHARLES
J. GOSSE
J. JULIEN
C. ROBERT

ANNEE SCOLAIRE 1969 - 1970DOYEN : M. AUBRYASSESEUR : M. GAYDoyens honoraires : MM. CORNUBERT - ROUBAULTProfesseurs honoraires : MM. RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JOLY - LAPORTE - EICHBORN - CAPELLE - GODEMENT - DUBREUIL - L. SCHWARTZ - DIEUDONNE - DE MALLEMAN - LONGCHAMON - LETORT - DODE - GAUTHIER - GOUDET - OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE - GUERIN - WAHL.Maîtres de Conférences honoraires : MM. LIENHART - PIERRET - Melle MATHIEUPROFESSEURS

MM. ROUBAULT	Géologie	GAYET	Physiologie
VEILLET	Biologie Animale	HADNI	Physique
BARRIOL	Chimie Théorique	*BASTICK	Chimie
BIZETTE	Physique	DUCHAUFOR	Pédologie
GUILLIEN	Electronique	GARNIER	Agronomie
LEGRAS	Mécanique Rationnelle	NEEL	Chimie Organique Indus-
BOLFA	Minéralogie	BERNARD	Géologie Appliquée
NICLAUSE	Chimie	*CHAMPIER	Physique
FAIVRE	Physique Appliquée	*GAY	Chimie Biologique
AUBRY	Chimie Minérale	STEPHAN	Zoologie
COPPENS	Radiogéologie	*CONDE	Zoologie
DUVAL	Chimie	*WERNER	Botanique
FRUHLING	Physique	EYMARD	Calcul Différentiel & Intégral
HILLY	Géologie	LEVISALLES	Chimie Organique
LE GOFF	Génie Chimique	FELDEN	Physique
SUHRER	Physique Expérimentale	*GOSSE	Mécanique Physique
CHAPON	Chimie Biologique	*DAVOINE	Physique (ENSMIN)
HEROLD	Chimie Minérale Industrielle	HORN	Physique (1 ^o Cycle)
SCHWARTZ	Exploitation Minière	*ROCCI	Géologie
MALAPRADE	Chimie	DELPUECH	Chimie Physique
*MANGENOT	Botanique		

N.... Chimie Biologique
N.... Mécanique Appliquée
N.... Analyse Supérieure
N.... Méthodes Mathématiques de la Physique
N.... Mécanique Rationnelle

(*) Professeur titulaire à titre personnel.

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Mme BASTICK	Chimie P.C. EPINAL	BALESDENT	Thermodynamique, Chimie Appliquée (ENSIC)
MM. GUDEFIN	Physique		Minéralogie Appliquée (ENSG)
VUILLAUME	Psychophysiologie	BLAZY	Physique P.C. EPINAL
FRENTZ	Biologie Animale	JANOT	Entomologie Appliquée (ENSA)
MARI	Chimie (ISIN)	CACHAN	Pédologie et Chimie agricoles
AUROUZE	Géologie	JACQUIN	Physique M.P.
DEVIOT	Physique du Solide	MAINARD	Chimie P.C.
FLECHON	Physique P.C.	MARTIN	Mécanique Expérimentale
Mle. HUET	Mathématiques C.B.G.	PAULMIER	Minéralogie
VIGNES	Métallurgie	PROTAS	
JURAIN	Géologie C.B.G.		

MAITRES DE CONFERENCES

MM. JOZEFOWICZ	Physico-Chimie	GERL	Physique
RIVAIL	Chimie Appliquée (CUCES)	ROQUES	Chimie Minérale
VILLERMAUX	Génie Chimique	FERRIER	Mathématiques
METCHE	Biochimie Appliquée (Brasserie)	GILORMINI	Mécanique (ISIN)
PAIR	Mathématiques Appliquées	N....	Mécanique des fluides (ISIN)
BAUMANN	Physique 1 ^o Cycle	N....	Mathématiques
DURAND	Physique	N....	Mathématiques P.C.
GRANGE	Physique (ISIN)	N....	Mathématiques C.B.G.
DEPAIX	Probabilités et statistiques	N....	Physiologie Animale
BAVEREZ	Chimie (ENSIC)	N....	Mathématiques M.P.
CHAMBON	Exploitation Minière (Mines)	N....	Chimie Organique
HUSSON	Physique (ENSEM)		Mathématiques
WEISSLINGER	Physique		Chimie (ENSIC)

CHARGES D'ENSEIGNEMENTS

MM. AMARIGLIO - COEURE - DAVRAINVILLE - GIRARDEAU - HILY - MAURIN - NOVERRAZ - OVAERT - RUYER - WEBER.

A MES PARENTS,

Le présent travail, objet d'un contrat de recherche avec la Société Lorraine de Laminage Continu, a été réalisé au Laboratoire de Mécanique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique, sous l'égide de Monsieur le Professeur J. GOSSE, Directeur de l'Ecole. C'est grâce à son aide constante dans tous les domaines que nous avons pu mener notre travail à bien. Qu'il veuille trouver ici, l'expression de notre reconnaissance et de nos plus vifs remerciements.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur le Professeur J. AUBRY, Doyen de la Faculté des Sciences qui a bien voulu accepter de présider le jury.

Nous tenons également à remercier Monsieur ROSIER, Conseiller Technique, Attaché au Service des Fabrications de la SOLLAC, qui a répondu favorablement à notre invitation et a accepté de faire partie du jury.

Nous remercions très sincèrement Monsieur A. CHARLES, Directeur du Département de Génie Mécanique de l'Institut Universitaire de Technologie et Monsieur Y. PUJOL, Maître de Conférences qui ont accepté de faire partie du jury.

Que tous les ingénieurs de la SOLLAC, en particulier MM. ADAM-GIRONNE, Ingénieur en Chef du Service de Recherches, MONET, Chef du Service Thermique, ROUSSEAU, Ingénieur Principal et KESSLER, Ingénieur, soient remerciés pour l'aide qu'ils nous ont apportée au cours de notre travail, aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan matériel.

Enfin, nous exprimons nos remerciements à tous les chercheurs du Laboratoire de Mécanique pour l'ambiance agréable qu'ils ont su créer et nous n'oublierons pas, que ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans l'aide de tout le personnel technique de l'atelier et du Laboratoire.

TABLE DES MATIERES

Pages

PREMIERE PARTIE

Chapitre I	Etude du mouvement de la flamme et des fumées dans une cellule Pit	2
I-1	Conditions de similitudes	3
I-2	Dispositif expérimental	11
I-2.1	Chambre d'expérience	11
I.2.2	Brûleur	11
I.2.3	Lingots	12
I.2.4	Eclairage dans un plan horizontal	12
I.2.5	Eclairage dans un plan vertical	13
I.2.6	Visualisation	13
I.2.7	Dispositifs cinématographique et photographique	14
I.3	Etude de quelques cas typiques de charge et de dimensionnement de la cellule	15
I.3.1	Généralités	15
I.3.2	Cellule basse avec charge n° 1	17
I.3.3	Cellule haute avec charge n° 1	19
I.3.4	Cellule basse avec charge n° 2	22
I.3.5	Autres types de chargements	25
I.4	Résultats quantitatifs approchés déduits des photographies	25
I.4.1	Remarques à propos des tableaux de résultats	25
I.4.2	Etude de l'influence des différentes variables sur le fonctionnement de la cellule	27
I.4.3	Conclusions techniques	30
I.5	Conclusion du chapitre I	40

DEUXIEME PARTIE Etude du rayonnement thermique

Chapitre II	Facteurs géométriques	41
II-1	Généralités	41
II-2	Cas des surfaces planes	43
II-2.1	Facteur géométrique entre un élément infinitésimal et une surface finie	43
II-2.2	Facteur géométrique entre deux surfaces finies	44
II-3	Détermination numérique de facteurs géométriques dans quelques cas particuliers	45
II-4	Etude des facteurs géométriques dans la cellule Pit, en fonction de l'inclinaison des lingots par rapport à l'axe longitudinal de la cellule	46
II-4.1	Remarques générales	46
II-4.2	Etude des facteurs géométriques relatifs à chaque face de lingot	48
II-5	Conclusion du chapitre II	54
Chapitre III	Bilan des énergies rayonnées à l'intérieur de la cellule	54
III-1	Généralités	55
III-2	Méthode utilisée	58
III-3	Evolution des flux calorifiques nets rayonnés, en fonction de l'inclinaison des lingots par rapport à l'axe longitudinal de la cellule	61
	Conclusion	64

ANNEXES

I Calculs relatifs à l'analogie

II Détermination de facteurs géométriques dans
quelques cas particuliers

BIBLIOGRAPHIE

NOTATIONS RELATIVES AU CHAPITRE I

$C_{\bullet}$	Concentration en fluide de l'injecteur après mélange complet
g	Accélération de la pesanteur
G_o	Impulsion du fluide à la sortie de l'injecteur
G_f, G_a	Impulsion des fluides primaire et secondaire à la sortie de l'injecteur
L	Demi profondeur de la chambre d'expérience
m_f, m_a	Débits massiques du fluide primaire et du fluide secondaire
m_a	Débit massique recirculé
p	Pression
r_f, r_a	Rayon des injecteurs de fluide primaire et secondaire
r_o	Rayon de l'injecteur
r_e	Rayon équivalent de l'injecteur
S_f, S_a	Aires des entrées de fluide primaire et secondaire
u, v, w	Composantes de la vitesse dans l'enceinte
F	Nombre de Froude
P	Nombre d'Euler
Re	Nombre de Reynolds
δ	Diamètre hydraulique des carneaux
λ	Echelle de réduction
μ	Viscosité cinématique du fluide
ρ	Masse volumique du fluide
ρ_b	Masse volumique des gaz de la flamme à leur température effective
ρ_f, ρ_a	Masse volumique des fluides primaire et secondaire à l'intérieur de l'injecteur
c	Indice relatif au modèle
h	Indice relatif au prototype

NOTATIONS RELATIVES AUX CHAPITRES II ET III ET A L'ANNEXE II

F_{i-J}	Facteur géométrique de la surface J depuis la surface i
F_{di-J}	Facteur géométrique de la surface J depuis l'élément di
F_{di-dJ}	Facteur géométrique de l'élément de surface dJ depuis l'élément di
$\mathcal{F}$	Facteur global, $\mathcal{F}_{1-2}$ désigne le rayonnement dont l'origine est en S_1 et qui atteint la surface S_2 , en tenant compte des réflexions multiples sur les autres zones
l, m, n	Cosinus directeurs
Q_{ij}	Puissance totale rayonnée depuis la surface i vers la surface J
r	Distance entre un point de la surface i et un point de la surface j
$\bar{r}$	Distance réduite
S_i	Aire de la surface i
$\bar{S}$	Aire réduite
T	Température absolue
T_i	Température de la surface i
x, y, z	Coordonnées cartésiennes
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Coordonnées cartésiennes réduites
δ_1, δ_2	Angles entre la normale à un élément de surface dA_1 ou dA_2 et le segment $(dA_1 - dA_2)$ de longueur r
ϵ	Facteur total d'émission
ρ	Facteur de réflexion
ω	Densité relative de flux de rayonnement
Q_{net-k}	Flux total chaleur sur la surface k. Positif s'il est reçu

I N T R O D U C T I O N

Le but de ce travail est de déterminer de quelle manière il serait possible d'améliorer le fonctionnement des cellules Pits, implantées à la Société Lorraine de Laminage Continu (SOLLAC). En effet, en cours de production, il a été constaté par cette entreprise, que les lingots de grande taille n'étaient pas réchauffés uniformément.

Des travaux antérieurs menés dans différents laboratoires, ont montré que la plus grande partie de l'apport d'énergie calorifique vers les lingots, était due aux échanges par rayonnement entre la charge, les parois du four et les gaz chauds. Cependant, COLLIN [15] pense qu'une répartition uniforme de température dans le métal chauffé, ne peut être obtenue avec une répartition défavorable du champ des vitesses.

Pour cette raison, nous avons scindé le travail en deux parties :

- 1°) Une étude analogique expérimentale de l'écoulement du fluide à l'intérieur d'une maquette de la cellule Pit.
- 2°) Une étude théorique du rayonnement à l'intérieur du four.

La première partie de ce travail a été réalisée sur une maquette au 1/10^e des cellules Pits utilisées à la SOLLAC, de manière à examiner le grand nombre de paramètres pouvant influencer sur le type de l'écoulement, l'étude du phénomène a été réalisée par visualisation. En effet, il était impossible de tracer la carte des vitesses à l'intérieur de la maquette dans chaque cas étant donné la complexité du champ des vitesses. La visualisation était le seul moyen suffisamment rapide pour étudier le phénomène dans ses grandes lignes.

La deuxième partie de ce mémoire concerne :

- le calcul des facteurs géométriques,
- le bilan de l'énergie échangée par rayonnement entre les faces des lingots et les parois du four. Les calculs théoriques ont été tabulés grâce à un ordinateur IBM 1800, à mémoire centrale de 16 K mots de 16 bits plus deux bits de parité. Les programmes ont toujours été écrits dans le but d'optimiser le temps de calcul.

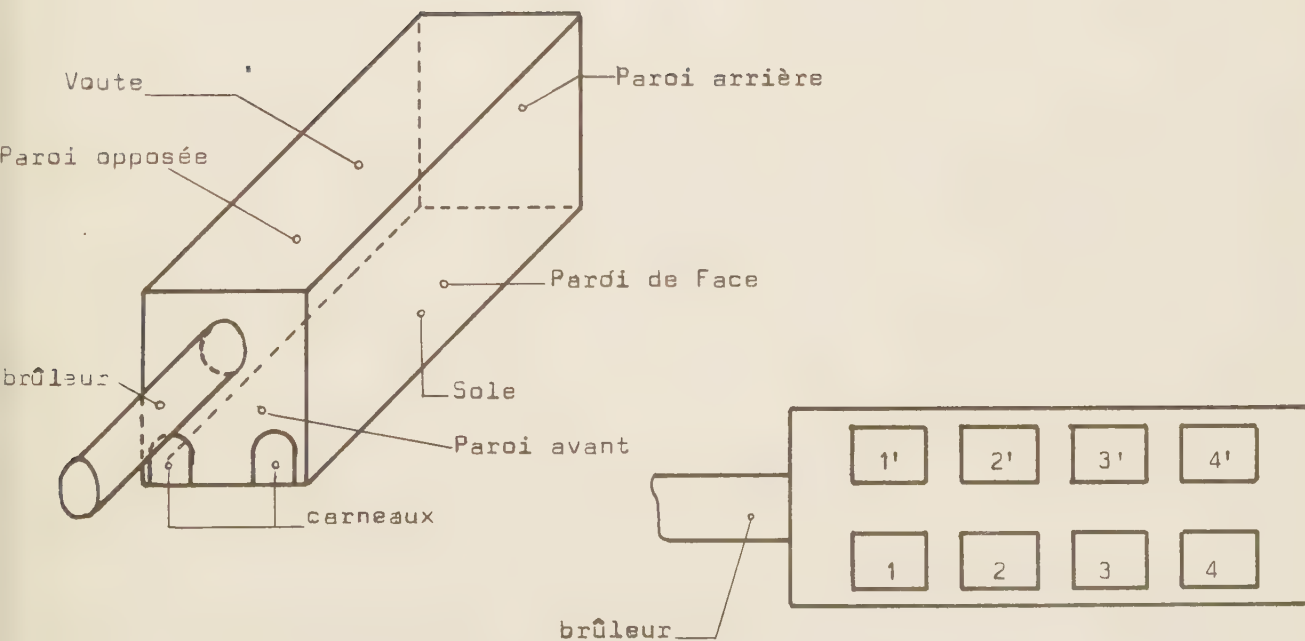
PREMIERE PARTIE

I - ETUDE DU MOUVEMENT DE LA FLAMME ET DES FUMÉES DANS UNE CELLULE PIT

Au cours de cette partie, on se propose de déterminer la valeur des différents paramètres pouvant influencer sur le chauffage des lingots par convection.

Les fours étudiés sont des cellules Pits à un seul brûleur (one way soaking Pit), dont le schéma général est donné par la figure 1.

Pour réaliser cette série d'expériences, nous avons été amenés à étudier les possibilités d'analogie entre le développement d'une flamme turbulente, l'écoulement des fumées à l'intérieur d'un four, et un écoulement de fluide isotherme à l'intérieur d'un modèle.



b disposition des lingots

Les diverses formules employées ci-dessous, font appel aux notations décrites au début de ce mémoire.

I-1 Conditions de similitude

Depuis 1950, de nombreux mémoires [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8], ont été publiés sur ce sujet.

Dans le cas d'un jet isotherme en espace confiné, la concentration massique en fluide issu de l'injecteur après mélange complet dans la chambre d'expérience, est donnée par :

$$C_{\infty} = \frac{m_f}{m_a + m_f} \quad (1)$$

On peut facilement montrer que $C_{\infty} L / r_0$ doit être égal sur le modèle et sur le prototype, pour que la similitude existe.

En 1953, THRING et NEWBY [1] ont montré que, dans le cas d'une flamme turbulente confinée, il était possible de déterminer un diamètre d'injecteur équivalent sur le modèle. Ils ont établi la relation suivante :

$$\left(\frac{m_f}{m_a + m_f} \frac{L}{r_0} \right)_c = \left(\frac{\sqrt{G_0 \rho_b \pi}}{m_a + m_f} L \right)_h \quad (2)$$

pourvu que le jet non isotherme atteigne la densité moyenne ρ_b très près du brûleur ; dans une région où l'hypothèse de la conservation de l'impulsion peut être considérée comme valable.

Plusieurs études expérimentales [13, 14], ainsi qu'un travail de SUNAVALA effectué au Laboratoire de Sheffield, sur l'évolution de la concentration sur l'axe du jet, ont montré que le paramètre de recirculation :

$$\theta = \frac{m_a + m_f}{m_f} \frac{r_e}{L} \quad (3)$$

proposé par THRING et NEWBY permettait des prédictions quantitatives assez précises, en ce qui concerne différents paramètres, tels que le taux de recirculation, la position et la taille des tourbillons de recirculation...

Pour notre part, on admet qu'il est impossible de représenter parfaitement sur le modèle, les phénomènes dûs à la combustion.

La similitude proposée ne pourra donc être qu'approchée. Néanmoins, les résultats obtenus peuvent représenter la réalité à 10 % près ; ce qui paraît suffisant pour le problème actuel.

Comme point de départ de l'étude analogique, nous posons la prépondérance des phénomènes aérodynamiques sur les phénomènes dûs aux flammes de diffusion. En effet, on peut admettre que dans les fours à température élevée, l'échelle des temps chimiques est très inférieure à celle des temps aérodynamiques : il faut approximativement une seconde à une particule pour parcourir la distance brûleur-extrémité de la flamme, alors que, les réactions chimiques ne durent que quelques millièmes de seconde.

Le phénomène de diffusion est donc contrôlé par deux types de variables :

- a) les phénomènes liés à la géométrie de la chambre d'expérience,
- b) les caractéristiques du fluide.

Finalement on retiendra les critères de similitude suivant :

- conservation du nombre de Reynolds, caractéristique du frottement à la paroi. On écrit cette égalité dans une région où les répartitions de température et de vitesse sont assez homogènes, c'est-à-dire aux carneaux.

- conservation du rapport entre les forces subies par le fluide lors de sa mise en mouvement et à sa sortie du four. Ceci correspond à la conservation du rapport des quantités de mouvement au brûleur et au carneaux.

Ces critères se traduisent par les deux relations :

$$Re_c = Re_h$$

$$\left(\frac{I_{\text{brûleur}}}{I_{\text{carneaux } c}} \right) = \left(\frac{I_{\text{brûleur}}}{I_{\text{carneaux } h}} \right) \quad (4)$$

Les critères obtenus sont identiques à ceux de THRING et NEWBY.

Une étude réalisée à partir des théories de l'analyse dimensionnelle [2], permet d'obtenir des résultats voisins et complémentaires.

Les différentes grandeurs intervenant dans le phénomène, sont :

- Les paramètres géométriques de la chambre d'expérience, à savoir :
 - L, l, h respectivement longueur, largeur, hauteur de la cellule, qui sont réduites sur le modèle dans le rapport $\lambda = 1/10$,
 - δ diamètre hydraulique des carneaux,
 - h' hauteur des rugosités,
 - α angle d'inclinaison de l'injecteur.
- Les paramètres caractérisant le fluide utilisé :
 - ρ masse volumique,
 - μ viscosité cinématique du fluide
- Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement :
 - V vitesse aux carneaux,
 - P pression aux carneaux,
 - I quantité de mouvement du fluide au brûleur
- Enfin, g accélération de la pesanteur.

La matrice dimensionnelle formée par ces grandeurs est la suivante :

	δ	ρ	V	μ	$I_{\text{brûleur}}$	P	g	h'	α
L	1	-3	0	-1	1	-1	1	1	0
M	0	1	1	1	1	1	0	0	0
T	0	0	-1	-1	-2	-2	-2	0	0

Les grandeurs ρ, V, δ permettent de former un déterminant non nul, et seront choisies comme nouvelle base d'unité.

Les groupements adimensionnels obtenus sont les suivants :

$$\pi_1 = \frac{\rho V \delta}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds}$$

$$\pi_2 = \frac{V^2}{g \delta} \quad \text{Nombre de Froude}$$

$$\pi_3 = \frac{h'}{\delta} \quad \text{Coefficient de rugosité}$$

$$(5) \quad \pi_4 = \frac{\rho V^2 \delta^2}{I_{\text{brûleur}}} \quad \text{Coefficient d'impulsion}$$

$$\pi_5 = \frac{\rho V^2}{p} \quad \text{Nombre d'Euler}$$

$$\pi_6 = \alpha$$

L'application du théorème de WACHY-BUCKINGHAM, conduit à une loi du type :

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5, \pi_6, \frac{L}{\delta}, \frac{1}{\delta}, \frac{h}{\delta}) = \pi_4 \quad (6)$$

Etant donné qu'il est impossible d'obtenir une similitude conservant à la fois les nombres de Reynolds et de Froude, on admet que les forces de pesanteur sont négligeables vis à vis des forces de viscosité, ceci permet de ne pas tenir compte du groupement π_2 .

De plus, pour des raisons d'effet d'échelle, il n'est pas possible de simuler les rugosités. Il ne reste donc que sept nombres adimensionnels : $\pi_1, \pi_4, \pi_5, \pi_6, L/\delta, 1/\delta, h/\delta$.

Il est aisé de remarquer que le groupement π_4 conduit à l'équation (4.2). En effet, $\rho V^2 \delta^2$ n'est autre que l'impulsion aux carreaux. D'autre part, les valeurs de ρ_c/ρ_h et μ_c/μ_h sont fixées. La similitude sera conservée si :

$$\begin{aligned} \frac{\rho_c V_c \delta_c}{\mu_c} &= \frac{\rho_h V_h \delta_h}{\mu_h} \\ \frac{\rho_c d_c^2 V_c'^2}{\rho_c \delta_c^2 V_c^2} &= \frac{\rho_h d_h^2 V_h'^2}{\rho_h \delta_h^2 V_h^2} \\ \frac{\rho_c V_c^2}{p_c} &= \frac{\rho_h V_h^2}{p_h} \end{aligned} \quad (7)$$

où V' est la vitesse du fluide au brûleur.

La formule (7.1) permettra de calculer la vitesse équivalente du fluide aux carnaux, tandis que la conservation du rapport des impulsions entraînera la détermination du diamètre équivalent de l'injecteur.

Les échelles seront données par :

$$\begin{aligned}
 K_L &= \frac{1}{10} \quad , \\
 K_\rho &= \frac{\rho_c}{\rho_h} \quad , \\
 K_\mu &= \frac{\mu_c}{\mu_h} \quad , \\
 K_V &= \frac{\rho_h}{\rho_c} \left(\frac{\delta_h}{\delta_c \text{ carnaux}} \right) \frac{\mu_c}{\mu_h} = \frac{K_\mu}{10 K_\rho} \quad , \\
 K_T &= \frac{K_L^2 K_\rho}{K_\mu} \quad , \\
 K_P &= K_\rho K_L^2 K_V \quad .
 \end{aligned} \tag{8}$$

Les calculs numériques relatifs au cas actuel sont donnés à l'annexe 1.

ROBERTSON [6] pense, que dans le cas où la dimension du rayon de l'injecteur ne peut pas être considérée petite par rapport aux dimensions de la chambre d'expérience, il est préférable de garder au brûleur une similitude géométrique complète. Par contre, il semblerait nécessaire de distordre la longueur de la chambre d'expérience. En effet, on peut admettre que dans l'équation (3), L se rapporte à la distance axiale. Une longueur équivalente de mélange L'_x peut être définie sur le modèle, de telle manière que :

$$\frac{m_x}{m_o} = K \left(\frac{L_x}{r_o} \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_o}} \right)_h = K \left(\frac{L'_x}{r_o c} \right) \quad , \tag{9}$$

où L_x est la longueur du four, ρ_o et ρ_x les densités du fluide respectivement au brûleur et à la distance x , m_o et m_x les débits massiques aux emplacements décrits ci-dessus. Pour une maquette à l'échelle λ , complétée par une similitude conservant le nombre de Reynolds, la longueur équivalente du modèle sera donnée par :

$$(L'_x)_c = (L_x \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_o}})_h \lambda \quad . \tag{10}$$

Les résultats de ROBERTSON et FITZGERALD [5] confirment les travaux mentionnés ci-dessus.

Pour sa part, THURLOW [4] partant de considérations sur la similitude des impulsions, des masses volumiques et du champ des vitesses sur l'enveloppe des modèles "chaud" et "froid", démontre formellement le critère de THRING-NEWBY.

L'auteur montre que dans le cas où l'impulsion du fluide secondaire n'est pas négligeable, la similitude peut néanmoins être obtenue. Les rayons des injecteurs de fluide primaire et secondaire sont donnés par :

$$\frac{r_{fc}}{r_{fh}} = \lambda \left(\frac{\rho_{bc}}{\rho_{bh}} \times \frac{\rho_{fh}}{\rho_{fc}} \right)^{1/2}$$

$$\frac{r_{ac}}{r_{ah}} = \lambda \left\{ \frac{\rho_{bc}}{\rho_{ac}} \left(\frac{\rho_{ah}}{\rho_{ac}} \left[\frac{r_{ah}^2}{r_{fh}^2} - 1 \right] + \frac{\rho_{fh}}{\rho_{fc}} \right) \right\}^{1/2} \quad (11)$$

De plus, compte tenu de la différence entre les angles d'épanouissement des jets isothermes et avec combustion, mentionnée sur des essais de fours Martin (16 degrés et 25 degrés respectivement sur le four et sur le modèle), THURLOW [4], pense qu'il serait bon de réduire l'échelle linéaire de la maquette dans la direction du flux, dans la zone d'épanouissement du jet. La réduction d'échelle pourrait être proportionnelle au rapport des tangentes des demi-angles d'épanouissement, sur la maquette et sur le four. Cette remarque nécessite la connaissance préalable de l'enveloppe du jet à l'intérieur du four. Cette étude n'ayant pas pu être réalisée à SOLLAC, il sera impossible de tenir compte de la distorsion de longueur préconisée par THURLOW. Enfin, cet auteur constate comme M.W. THRING [1] que, dans le cas d'écoulements très turbulents, une faible différence dans les nombres de Reynolds peut être négligée, pourvu que les valeurs de ces nombres correspondent simultanément à un régime turbulent.

Dans un article de Jernkontorets Annaler, R. COLLIN [15] réalise une étude analogique du phénomène, basée sur les équations du mouvement :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g \cos \alpha_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) , \quad (12)$$

valable pour le four et le modèle.

Il est alors possible de mettre en évidence les nombres de Reynolds, de Froude et d'Euler.

De plus, COLLIN admet comme la plupart des autres auteurs que les forces de pesanteur sont négligeables devant les forces de viscosité, les conditions de similitude se réduisent à la conservation du nombre de Reynolds et du coefficient de pression. Enfin, l'auteur admet la nécessité de la conservation des impulsions au brûleur, ce qui rejoint les calculs de THRING-NEWBY.

Pour des chaudières de grandes dimensions, ANSON [7] pense que l'application du critère de THRING-NEWBY, pour la correction du diamètre de l'injecteur n'est pas valable. Par contre, l'introduction d'un morceau de toile métallique semblerait donner des résultats satisfaisant en ce qui concerne l'épanouissement du jet. La résistance offerte par le morceau de gaze, placé à une distance comprise entre x et $5x$ de la paroi de la maquette où débouche l'injecteur, est déterminée de telle sorte que, pour le jet libre, l'impulsion en aval soit celle qui corresponde à la similitude complète. L'excès d'impulsion en amont du morceau de toile produirait un taux d'entraînement important, correspondant à celui qui existe sur le four grandeur réelle. Ce taux d'entraînement semble être la résultante de la présence de gaz de forte densité au début du jet.

De plus, ANSON [7.11] admet que les caractéristiques les plus importantes du chauffage des fours et chaudières industrielles sont, le temps de séjour des fumées et le taux de mélange combustible-carburant-produits recyclés.

Ici nous pensons que les remarques de ANSON, formulées en raison de la présence de plusieurs brûleurs dans un espace réduit, ne peuvent être prises en considération dans le cas d'un four Pit à brûleur unique.

Pour sa part, TISSANDIER [3] montre que la similitude peut être obtenue sans conservation des nombres de Reynolds et de Froude, pourvu que certains paramètres soient introduits.

Dans le cas des vitesses axiales, pour un gaz ne contenant pas de particules solides, une relation peut donner les groupements adimensionnels intervenant dans l'analogie :

$$\frac{U^+}{U} = f \left(\sqrt{y} \frac{r_f}{L}, \frac{\sqrt{y}}{z} \frac{r_f}{L}, y, \frac{\rho_f}{\rho}, \frac{\rho_x}{\rho}, \frac{x}{L} \right), \quad (13)$$

où

$y = \frac{G_f}{G_o}$ est le facteur de distribution des impulsions au brûleur,

$z = \frac{m_f}{m_f + m_a}$ est le facteur de distribution des débits massiques au brûleur,

x est l'abscisse d'un point quelconque de l'axe, mesurée à partir du brûleur,

$U^+ = \sqrt{\frac{G_o}{\rho_b S^+}}$ est la vitesse d'impact du jet sur la paroi opposée du four, S^+ étant l'aire du cercle inscrit dans cette paroi.

De cette formulation, l'auteur déduit les critères de similitudes suivants :

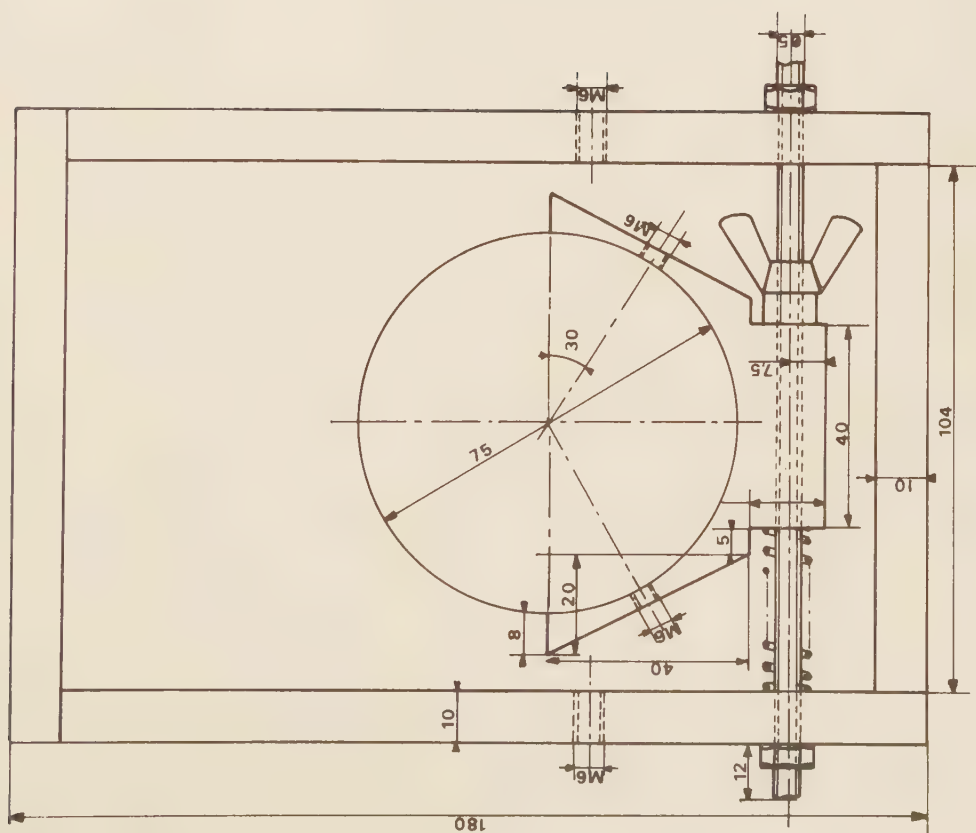
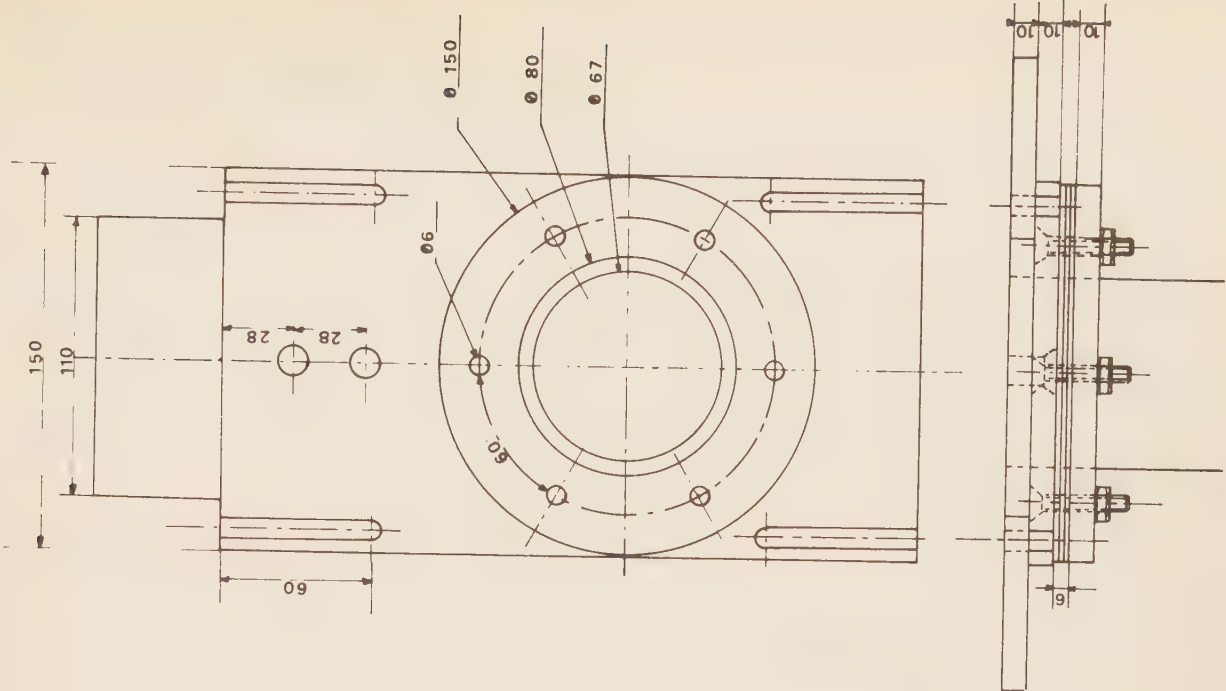
a) conservation du rapport $\frac{r_o}{L} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho}}$, de manière à maintenir la distance entre l'extrémité du brûleur et le point de contact jet-paroi identiques sur le modèle et le prototype.

b) conservation du facteur de distribution des débits massiques au brûleur.

c) conservation du nombre de Reynolds sur la surface de contact entre le jet et la paroi arrière de la cellule.

Enfin, compte tenu de la similitude entre le développement d'une flamme, l'écoulement des fumées à l'intérieur du four et l'écoulement d'un jet isotherme en présence de recirculation, on mentionnera les travaux de BARCHILLON et CURTET [9]. Un bref aperçu de ce travail figure dans l'un des chapitres suivants.

Enfin, un certain nombre de mémoires [17, 19, 20, 21, 22] traitent de l'étude expérimentale de l'écoulement des fumées à l'intérieur d'une chambre de combustion.



I-2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les travaux de visualisation ont été effectués sur une maquette au 1/10 d'une cellule Pit .

Le jet d'air est obtenu par un ventilateur entraîné par un moteur asynchrone triphasé 220 volts, 5,7 chevaux ; le débit d'air étant réglé par une vanne à guillotine. Le débit peut être mesuré à l'aide d'un débitmètre à diaphragme, (norme NF 10-101). Les mesures sont effectuées à l'aide d'un manomètre type FORTIER dont la précision est suffisante, compte tenu du fait que de faibles variations du nombre de Reynolds n'entraînent pas de changements notables dans l'écoulement [7, 12, 13, 14].

La maquette représente l'ensemble formé par le brûleur, le four, les carnaux et les récupérateurs poteries.

I-2.1 Chambre d'expérience

La chambre d'expérience correspondant au four proprement dit est constitué d'un parallélépipède de plexiglas, dont quatre faces sont recouvertes de peinture noire mate, de manière à éviter toutes réflexions parasites de la lumière. Les faces de la chambre d'expérience sont repérées de la manière indiquée à la figure 1a. Quatre des parois sont fixes. Seule la paroi arrière et la voûte sont mobiles ; ce qui permet, d'une part d'allonger la cellule, d'autre part d'en changer la hauteur et de procéder à des combinaisons des deux possibilités (inclinaison de la paroi arrière ou de la voûte). Sur les parois de face et opposée, des raies faites à l'aide d'une pointe à tracer permettent de repérer aisément les dimensions de la cellule.

La paroi supérieure est maintenue par l'intermédiaire de 6 boulons dans le cas de visualisation dans un plan horizontal et par 4 boulons dans le cas de visualisation dans un plan vertical, de manière à ne pas gêner l'éclairage le long de la paroi longitudinale.

I.2.2 Brûleur

Il est constitué par un tube de lucoflex usiné au diamètre de sortie préalablement déterminé (annexe 1) et fixé sur une glissière de plexiglas, par l'intermédiaire de brides et joints en caoutchouc, qui autorisent ainsi diverses orientations du jet ; les glissières permettent d'élever ou d'abaisser l'axe du brûleur par rapport à la position initiale de plus ou moins 3 cm (voir fig. 2).

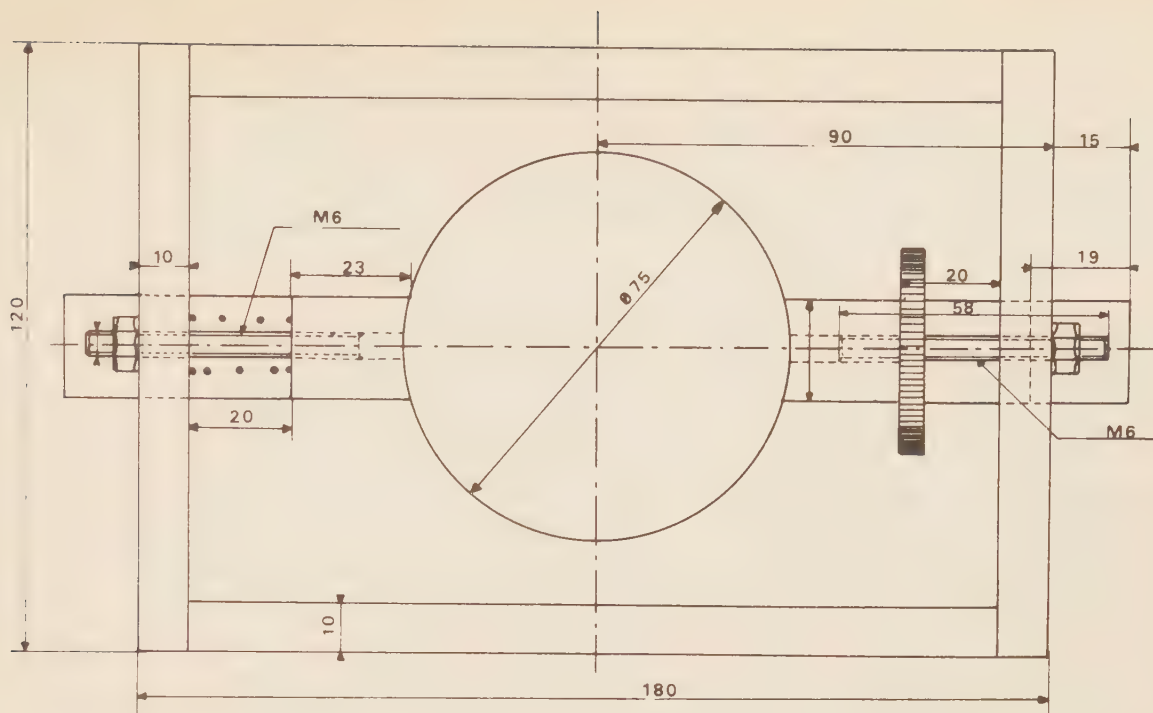


FIGURE 4

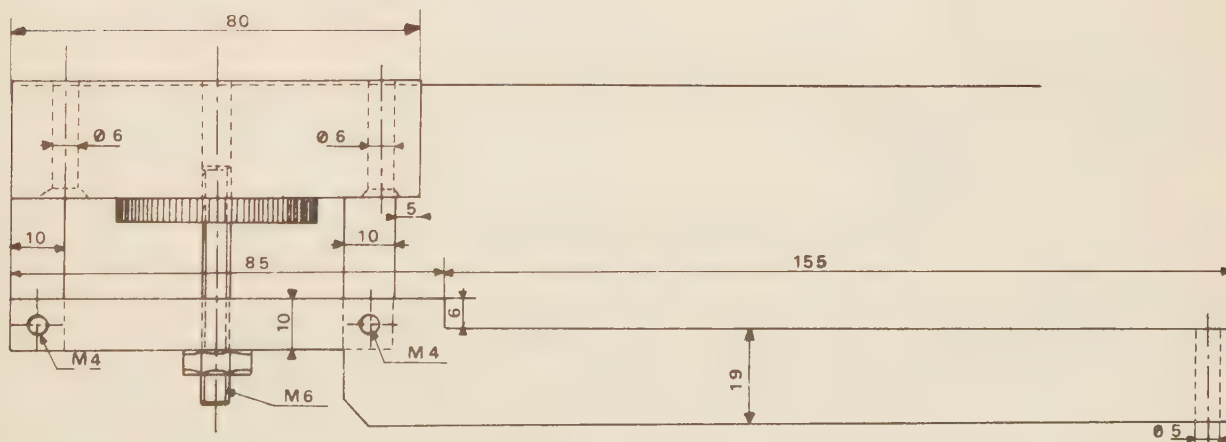


FIGURE 5

Deux vis de réglage avec ressort de rappel, placées à chaque extrémité de l'injecteur permettent un réglage du tube dans un plan horizontal (fig. 3, 4, 5). D'autre part, un parallélogramme placé sous le deuxième dispositif de réglage horizontal, permet le déplacement du brûleur dans un plan vertical.

Enfin, un tranquillisateur en nid d'abeille est monté au début du brûleur. Le réglage du brûleur est effectué optiquement. Un disque opaque percé en son centre d'un trou de 1 mm de diamètre, placé à l'extrémité de l'injecteur opposé à la chambre d'expérience, laisse passer la lumière émise par une source située à une distance de 15 cm. A l'autre extrémité du tube, se trouve un croisillon de fil de nylon noir dont l'une des branches est verticale. D'autre part, l'axe vertical de la paroi arrière est matérialisé par un trait noir pointillé.

On effectue tout d'abord le réglage de l'extrémité de l'injecteur côté four, en plaçant la paroi arrière à 5 cm de la paroi avant du four, et en faisant coïncider l'ombre de l'axe vertical du croisillon avec l'axe vertical de la paroi arrière, puis nous procédons de même, la paroi arrière repoussée en position normale, et ainsi de suite jusqu'à avoir le meilleur alignement possible.

I-2.3 Lingots

Différentes séries de lingots ont été étudiées : il s'agit, soit de lingots de types anciens, soit de types nouveaux.

Les divers types sont mentionnés dans le tableau 1 et les plans de chargement de la cellule sont décrits dans le tableau 2, aux figures 1b et 12.

Tous les lingots sont recouverts de peinture noire mate, de manière à éviter les réflexions parasites de la lumière émise par les sources d'éclairage.

I-2.4 Eclairage dans un plan horizontal

Il est réalisé à l'aide d'une boîte à lumière de 80 cm de long, contenant 2 lampes aux halogènes de 2 kw chacune et dont les filaments sont alignés (fig. 6).

Une fente de 3,5 mm de largeur est partiquée à la partie inférieure sur toute la longueur de la boîte, afin de laisser passer la lumière : de plus, les filaments des lampes se trouvent au foyer

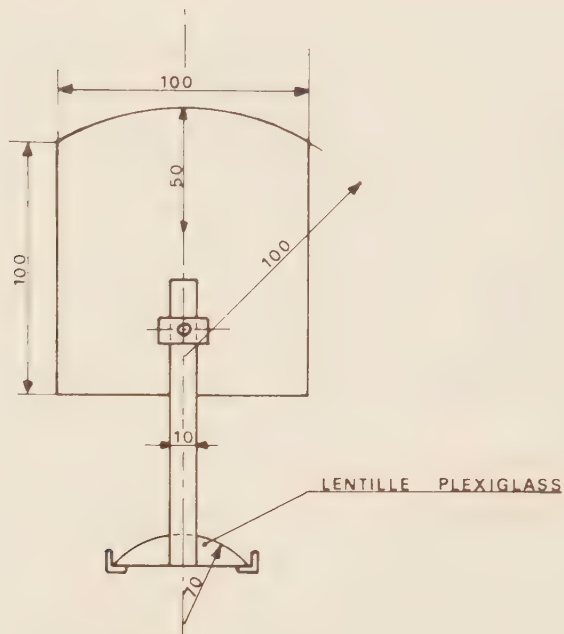
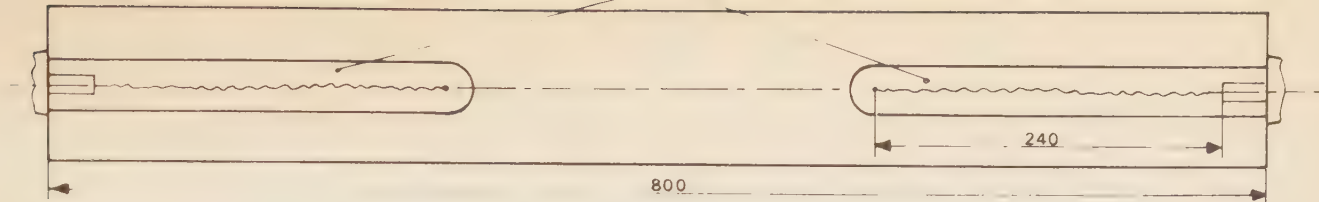
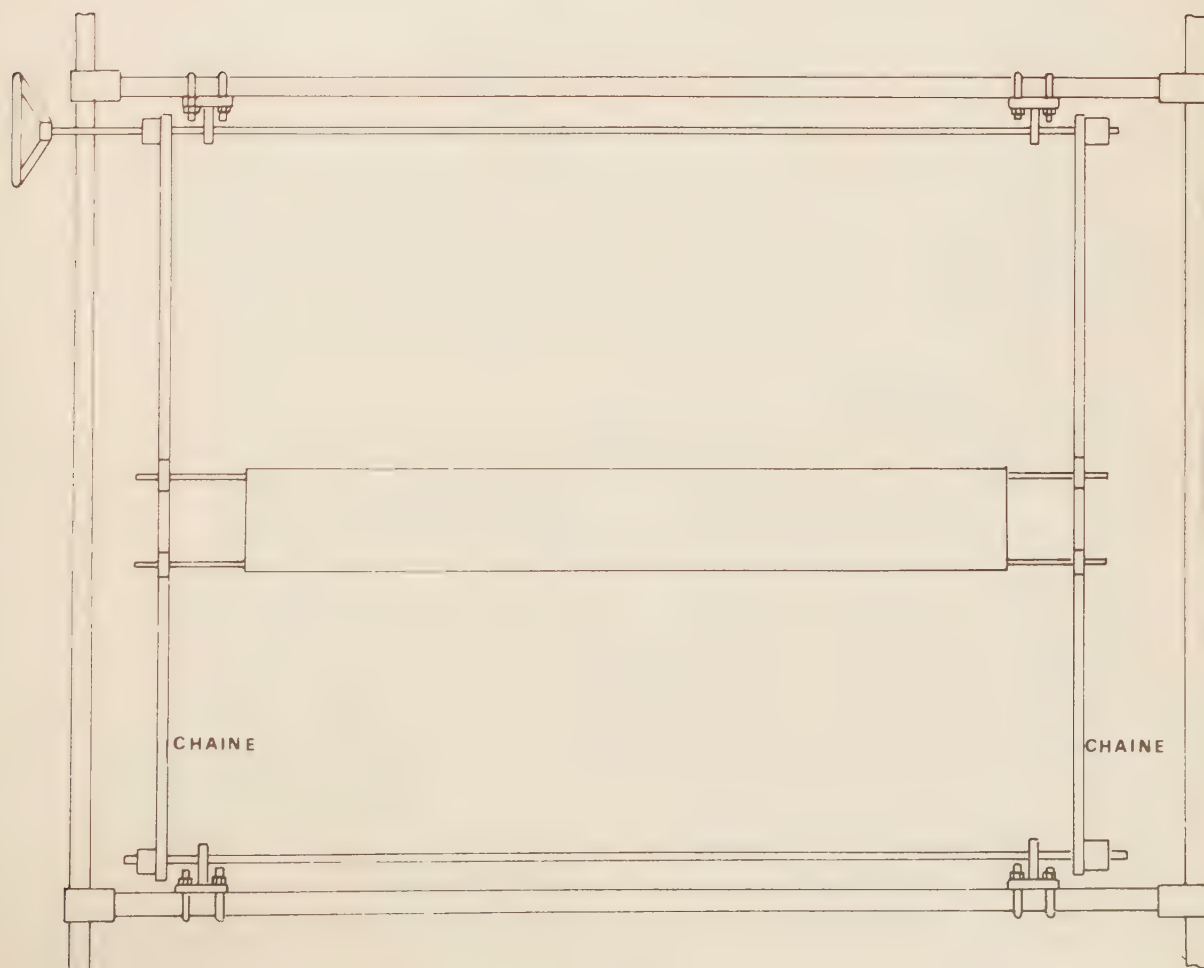


FIGURE 6



d'un miroir cylindrique formé par le couvercle de la boîte, ce qui permet un éclairage plus important de la fente.

Ces lampes dégageant une très grande énergie calorifique, deux ventilateurs de 1/5 CV chacun permettent de limiter l'échauffement de la paroi inférieure de la "boîte à lumière", d'éviter ainsi la dilatation et d'empêcher la fente de se refermer complètement. L'air de refroidissement est amené par deux conduites souples sur les lampes.

Enfin, une lentille cylindrique plan convexe de 7 cm de rayon de courbure, taillée dans du plexiglas est placée de telle manière que son plan focal soit confondu avec celui de la fente de la boîte à lumière. Elle permet d'obtenir un faisceau quasiment parallèle dans toute l'épaisseur de la cellule.

L'ensemble est supporté par deux tiges fixées sur chaînes, permettant ainsi un déplacement vertical aisé (schéma 7).

I-2.5 Eclairage dans un plan vertical

Il s'agit sensiblement de la même source lumineuse, mais améliorée de manière à ne plus avoir de contractions excessives de la fente due à un échauffement trop important du métal. Le système adopté permet le refroidissement de la fente par circulation d'eau. Cette dernière est formée de deux tubes rectangulaires 30 x 22, placés à 4 mm l'un de l'autre (fig. 8,9), traversés par une circulation d'eau. Afin d'éclairer l'écoulement le long de la paroi, il a été nécessaire de donner aux lentilles une forme cylindrique plan convexe partielle (fig. 10).

Les résultats donnés par ce type d'éclairage sont nettement supérieurs à ceux donnés par l'éclairage précédent, en effet, il devient possible de travailler plusieurs heures consécutivement sans que la fente se referme de manière sensible à l'oeil.

I-2.6 Visualisation

Plusieurs essais ont été faits ; tout d'abord avec de la poudre d'aluminium de 3 microns, puis avec des paillettes de densité apparente très petite, dont les dimensions étaient de l'ordre de 80 microns maximum.

Ces essais ont donnés de très mauvais résultats car la poudre d'aluminium se collait aux parois sous l'effet d'un phénomène

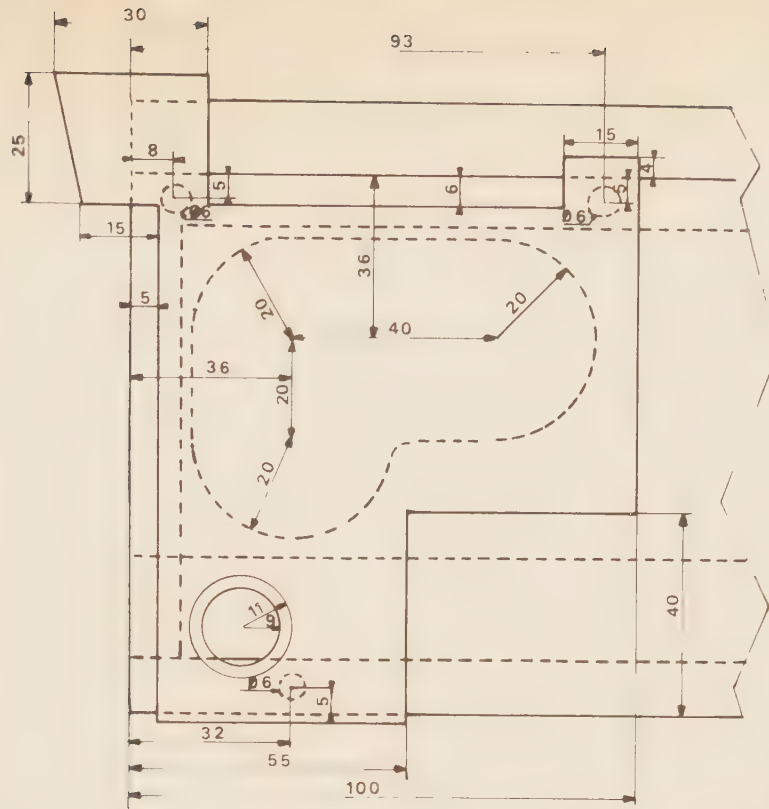
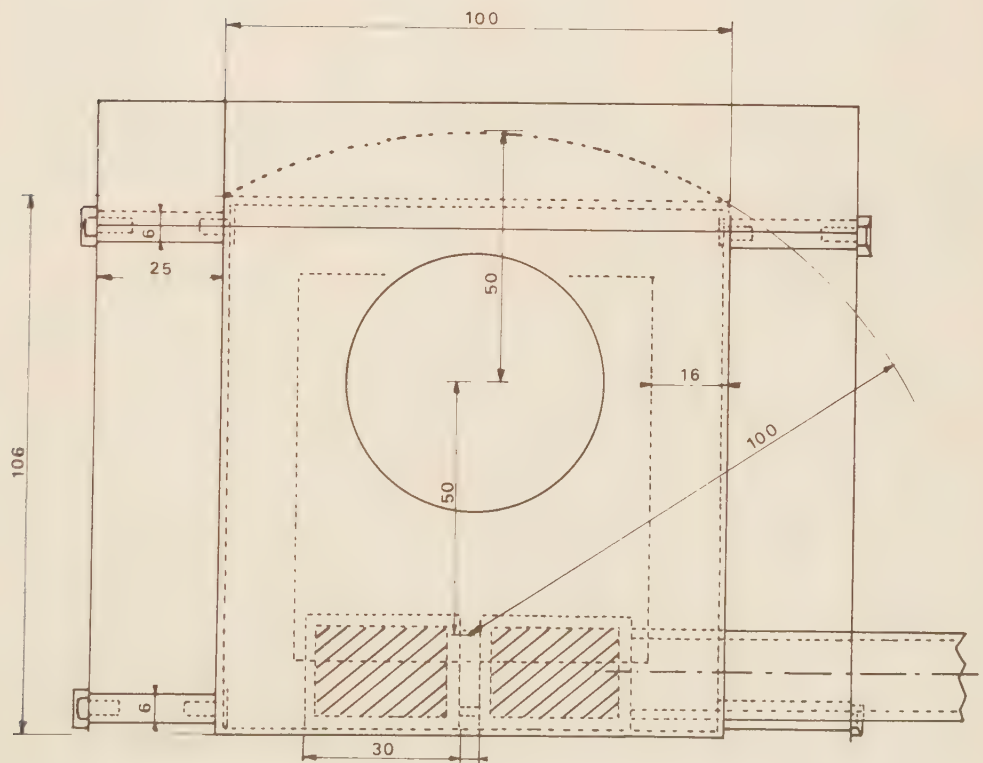


FIGURE 9



CIRCULATION D'EAU



FIGURE 10

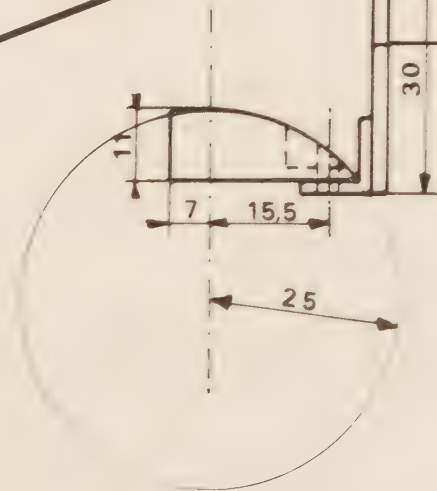
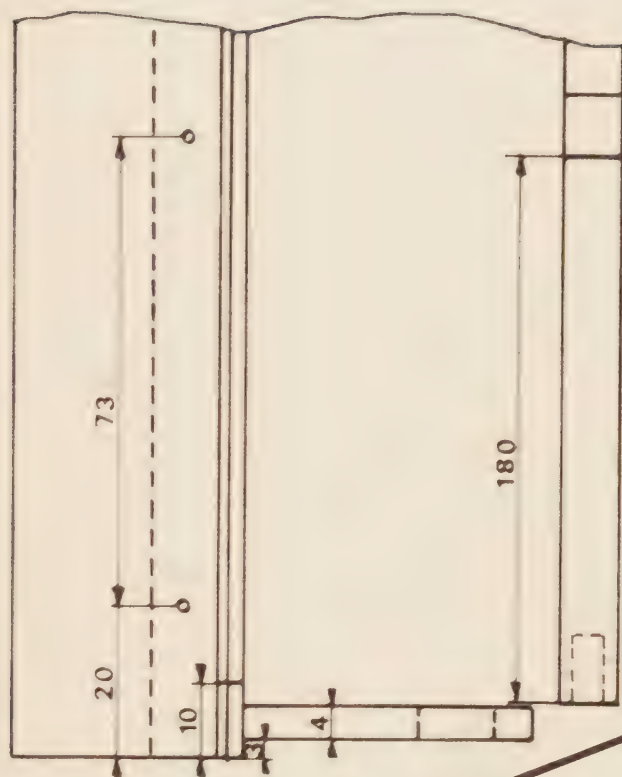


FIGURE 10

électrostatique dû au plexiglas, qu'il a été impossible d'éliminer malgré l'utilisation de plusieurs produits antistatiques.

Puis un essai a été fait avec de la poudre de plexiglas, qui était relativement visible mais dont la densité apparente était trop importante pour décrire correctement le phénomène.

Ensuite, l'injection de sciure de balsa très fine a permis une première approche.

Enfin, les meilleurs résultats ont été obtenus avec des lamelles de balsa, rendues plus visibles par un bain de fluoresceïne et un étuvage pendant 36 heures à 60°.

Les paillettes de balsa sont obtenues par découpages de blocs de bois, perpendiculairement aux fils, à l'aide d'une scie à disque. En faisant en sorte que la distance entre le plateau et la scie soit le plus faible possible.

Les lamelles obtenues ont des dimensions de l'ordre de 1 mm de long, 0,03 à 0,04 mm d'épaisseur et 0,8 mm de largeur.

I-2.7 Dispositifs photographique et cinématographique

I-2.7.1 Prises de vues photographiques

Nous disposons d'un appareil 24 x 36 de marque ALPA, type Reflex 6 C, équipé d'un objectif KERN Macro Switar dont la focale était de 50 mm et l'ouverture de 1,8/f.

Après plusieurs essais, on constate que les meilleurs résultats sont donnés par deux types de pellicules : Ilford HP 4 ou tri X Kodak, développé avec du révélateur Acutol S dilué à raison de 1 volume de révélateur pour 1 volume d'eau ; la durée du bain étant fixée à 22 minutes pour une température de 20°C.

Ces conditions de développement ont permis de prendre des vues au 1/500ème, au 1/250ème et au 1/125ème de seconde, en travaillant à ouverture maximale de 1,8, ce qui permet de limiter la profondeur de champ.

I-2.7.2 Dispositif cinématographique

Nous avons employé une caméra "Eclair International" type G.V 16, équipée d'un objectif "Angénieux" 15 mm ouverture 1,3,

utilisant un film 16 mm petit pas. Cette caméra n'utilise pas de système à prisme (système à griffe et contre-griffe), il est impossible d'obtenir une très grande stabilité des images au-dessus de 150 vues par seconde.

Les pellicules utilisées étaient du type 4 X Kodak négatives, développées par nos soins, en utilisant le même procédé que pour les essais photographiques.

I-3 ETUDE DE QUELQUES CAS TYPIQUES DE CHARGES ET DE DIMENSIONNEMENT DE LA CELLULE

I-3.1 Généralités

Les études théoriques et expérimentales trouvées dans plusieurs mémoires [3, 9, 12, 16], ont montré que : dans un jet clos le demi-angle d'ouverture était voisin de $9,5^\circ$, comme dans le cas du jet libre ; il a été cependant constaté que cet angle pouvait se réduire à 7° dans le cas où les dimensions de la chambre ne pouvaient pas être considérées comme très importantes vis à vis du diamètre de l'injecteur. Dans le cas des chambres cylindriques, la largeur du jet confiné tend vers une limite voisine de la moitié du rayon de la chambre [9].

D'autre part, on a constaté [3] que la longueur du noyau potentiel était comprise entre 5 et 6 fois la valeur du diamètre du "brûleur".

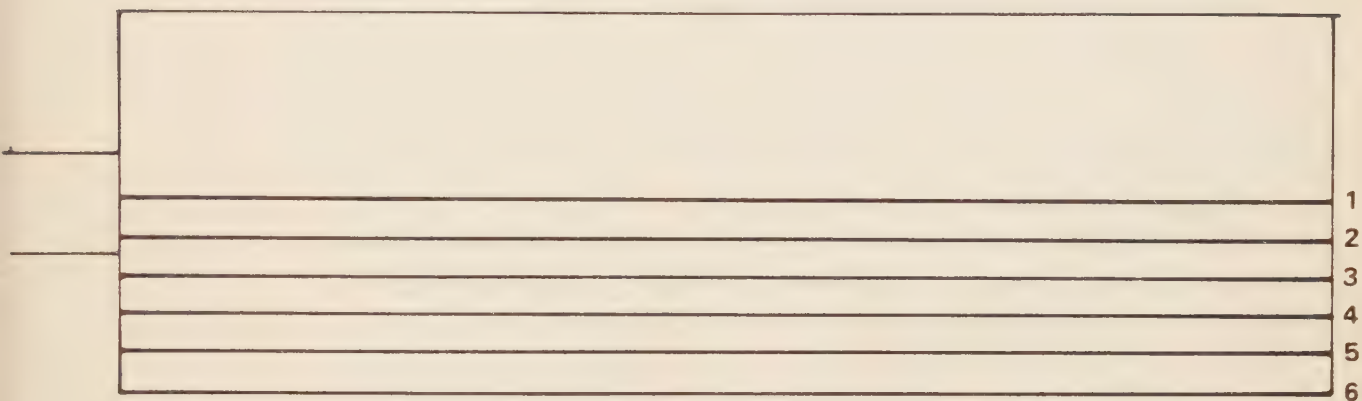
De plus, CURTET [16] met en évidence l'existence de la couche-limite dynamique lors de l'impact du jet sur la paroi et nous essaierons d'en montrer l'existence sur les clichés.

CURTET et BARCHILLON [9] montrent qu'en définissant une charge ambiante H_1 en combinant la pression statique à la paroi et la vitesse ambiante, on obtient :

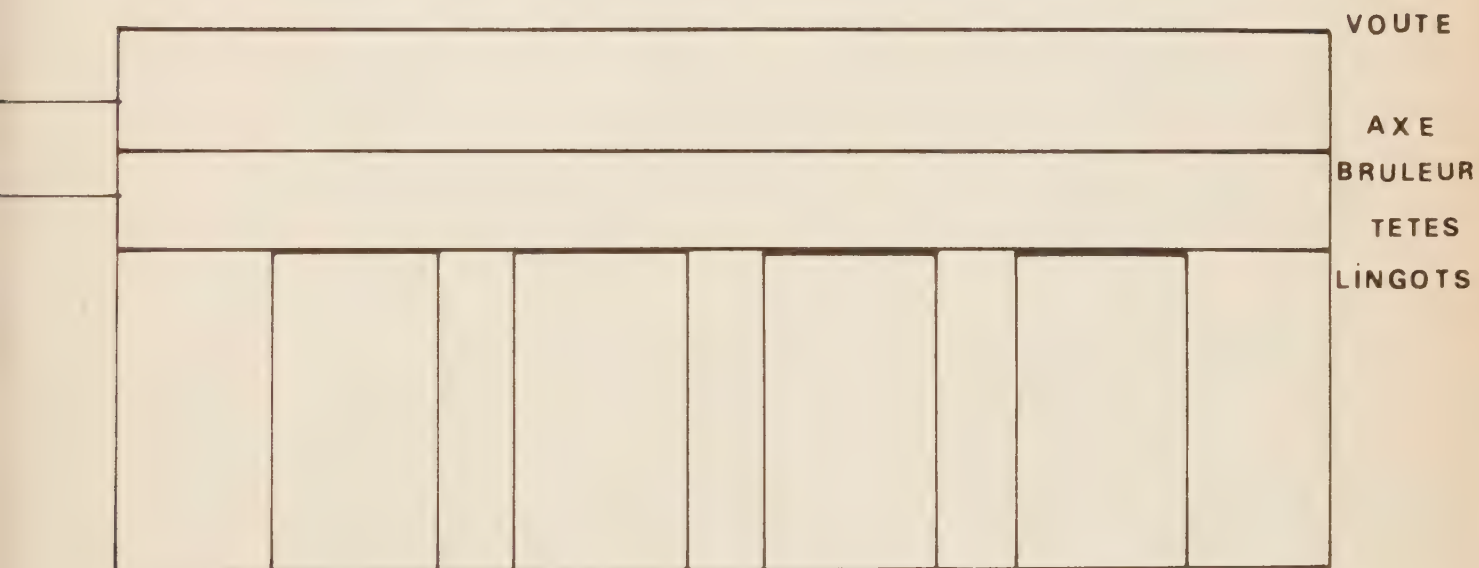
$$H_1 = \frac{P_1}{\varpi} + \frac{U_1^2}{2g} \quad , \quad (14)$$

à l'aide de la relation de BERNOUILLI.

Or, la charge H_1 augmente au coeur du tourbillon de recirculation et, on peut interpréter cette augmentation de charge ambiante dans le sens principal de l'écoulement, en supposant qu'il s'agit



A. PLANS DE VISUALISATION VERTICAUX



B. PLANS DE VISUALISATION HORIZONTAUX

FIGURE 11

d'une dissipation par turbulence de l'énergie du mouvement moyen du fluide ambiant qui s'écoule dans le courant de retour.

Ce qui conduit à utiliser une relation plus complète tenant compte des fluctuations turbulentes longitudinales u_1' , transversales v_1' et tangentielles w_1' ainsi que de la vitesse transversale V_1 :

$$H_1 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{U_1^2}{2g} + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{u_1'^2 + v_1'^2 + w_1'^2}{2g} \quad (15)$$

Les auteurs ont vérifié expérimentalement ces hypothèses et ont montré par visualisation dans un liquide que le jet s'élargit d'abord régulièrement, puis qu'il s'effiloche au contact du fluide recirculé. Les points de rencontre des jets recyclés et du jet direct n'étant pas les mêmes de chaque côté du jet principal, il devrait en résulter une oscillation du jet. Nous verrons s'il en est bien ainsi.

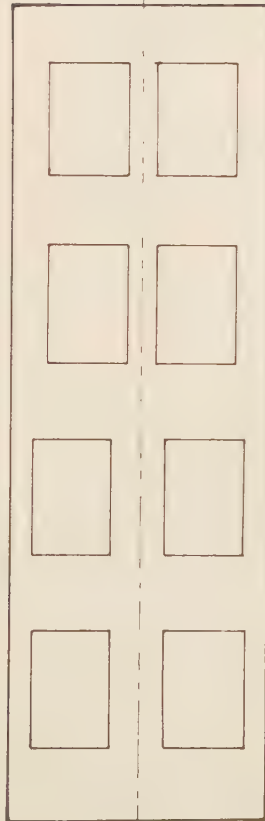
Dans le cas présent, la largeur de la maquette est de 250 mm. Pour notre part, nous avons essayé de déterminer les lignes de courant dans 6 plans verticaux répartis entre l'axe longitudinal et la paroi avant (fig. 11A) ; ces plans étaient distants de 25 mm et cela a permis de vérifier les théories énoncées ci-dessus, ainsi que de mettre en évidence certains points particulièrement intéressants : la longueur du contact flamme-voûte, la longueur des zones de contact entre flamme et lingots, les zones de recirculation et les zones de réabsorption des fumées dans la flamme, d'autre part, le jet étant en U il se produit dans certains cas un tourbillon dans la partie supérieure opposée au brûleur...

Nous déterminerons également les trainées produites par les lingots, ainsi que la zone d'impact du jet directement issu de l'injecteur sur la paroi longitudinale de la cellule.

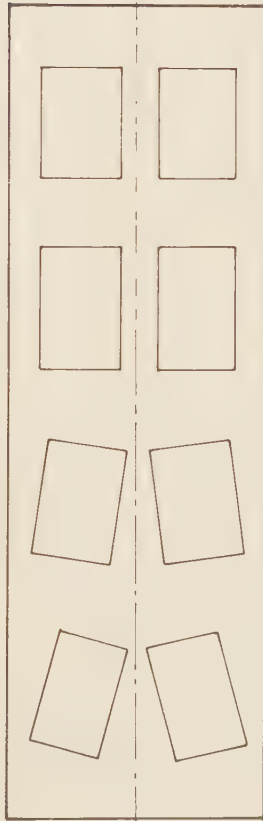
Enfin, nous examinerons de quelle façon les points de repère (pyromètre) placés de chaque côté de l'axe vertical, à 80 centimètres environ des parois longitudinales et à hauteur de l'axe du brûleur peuvent être représentatif de l'état de la cellule. De plus, des prises de vues ont été faites dans trois plans horizontaux : dans l'axe de l'injecteur, le long de la voûte et au-dessus des têtes des lingots (fig. 11B). Elles ont permis d'expliquer plus profondément les lignes de courant et, donc de confirmer les conclusions dues à la visualisation dans les plans verticaux.

PLANS DE CHARGEMENT

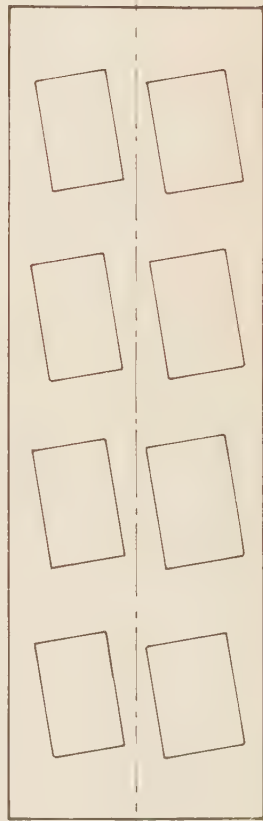
A



B



C



TYPE	LONGUEUR	LARGEUR	HAUTEUR
E	1,57	0,67	1,70
HB	1,16	0,81	2,20

TABLEAU 1

TYPES DE LINGOTS UTILISES

CHARGE N°	1 ^{er} RANGE	2 ^{er} RANGE	3 ^{er} RANGE	4 ^{er} RANGE
1	HB	HB	HB	HB
2	E	E	E	E
3	HB	HB	E	E
4	E	E	HB	HB

TABLEAU 2

PLANS DE CHARGEMENT

I-3.2 Cellule basse avec charge n° 1 (2001 à 2006)

Il s'agit du four de type utilisé actuellement. Le plan de chargement étant du type A, décrit à la figure 12.

I-3.2.1 Plan 1

On constate que le demi-angle d'ouverture du jet est voisin de 7° . Cependant, il est à remarquer que l'enveloppe inférieure est légèrement incurvée ; ceci semble dû à la réabsorption des fumées. D'autre part, le noyau potentiel est parfaitement visible : il s'agit de la zone centrale du jet qui, du fait de la plus grande vitesse du fluide est nettement plus sombre que le pourtour ; on peut voir que sa limite est assez voisine de la limite théorique inférieure (5 fois le diamètre de l'injecteur).

La couche-limite quant à elle semble peu visible, néanmoins, nous remarquons l'existence d'un décollement du jet à la paroi supérieure, qui entraîne la naissance d'un tourbillon à l'extrémité droite du four.

On remarque également que le jet donne bien naissance à une circulation du fluide en forme de fer à cheval, avec réabsorption du fluide par le jet issu de l'injecteur.

Quant aux limites du contact flamme-voûte et flamme-lingot il est parfaitement possible de les définir en admettant que la longueur moyenne de la flamme est voisine de 5 m sur le four grandeur réelle.

I-3.2.2 Plan 2

Nous constatons que le jet s'élargit dans la partie supérieure alors que, dans la partie inférieure cette évolution est contrariée par la présence de la réabsorption de "fumée" dans le jet. Il est possible de voir que le tourbillon arrière a tendance à s'agrandir et, qu'un point d'impact du jet sur le lingot n° 3 le dévie vers le haut. Il est aisé comme dans le plan 1, de trouver les limites des contacts flamme-voûte et flamme-lingot.

I-3.2.3 Plan 3

Il est ici assez difficile de déterminer les lignes de courant, en effet, nous nous trouvons dans un plan situé au quart

du lingot, donc l'écoulement est très fortement perturbé.

Néanmoins, on remarque que le tourbillon arrière a toujours tendance à s'agrandir, alors qu'un tourbillon au début du four semble prendre naissance. Il est permis de croire que ce tourbillon est dû à la recirculation vers le jet.

Dans ce plan nous pouvons déterminer les masques qui sont relativement importants entre les lingots 1, 2 et 2, 3, et moins prononcés pour l'espace 3, 4. Ceci semble normal, compte tenu du fait que le tourbillon arrière a tendance à dévier le jet de l'injecteur vers le bas, et à le diriger vers la tête du lingot 4 et dans l'espace laissé libre entre les lingots 3 et 4.

I-3.2.4 Plan 4

Nous constatons que le jet pénètre dans le plan 4 quelques millimètres avant le lingot n° 3, il est dévié vers le bas et permet ainsi d'avoir une zone de fluide mort très faible entre les lingots 3 et 4.

Compte tenu de ces remarques, il semblerait que dans un plan horizontal situé à 35 mm de la voûte, le tourbillon arrière arrive à son extrémité. L'importance du tourbillon avant à sensiblement augmenté.

Quant aux traînées, elles sont toujours aussi importantes entre les lingots 1, 2 et 2, 3.

L'écoulement du fluide par les carneaux, semble se faire correctement en partie par le bas, en partie par le haut.

I-3.2.5 Plan 5

Le jet venant de l'injecteur apparaît dans le plan 5 entre les sommets de lingots 3 et 4, puis est aspiré vers les carneaux. Ceci explique la forme des filets fluides dans le bas du Pit, et dans le haut, où la ligne de flux logique est gênée par la présence des lingots.

Nous remarquons toujours la présence d'un "tourbillon avant" qui s'est accru légèrement par rapport au plan 4.

D'autre part, les lingots étant alignés mais légèrement décallés, on constate que le fluide, à son retour vers les carneaux

rencontre à assez grande vitesse la face arrière du lingot 2 et qu'il semble aspiré vers l'espace laissé libre entre ce lingot et la paroi longitudinale.

De même que dans les cas précédents, il est facile de déterminer les zones mortes entre lingots.

I-3.2.6. Plan 6

On constate que toutes les lignes de flux partent de l'extrémité arrière de la maquette et se dirigent vers les carneaux ; nous pensons que le jet issu de l'injecteur arrive sur la paroi arrière en haut de la cellule.

On note une très forte densité de particules tout au long de la paroi avec un tourbillon dans le coin gauche du cliché ; tourbillon dont nous avons remarqué la naissance dans le plan 3. De plus, un tourbillon hélicoïdal se développe à la partie inférieure de la cellule.

Enfin le jet heurte la paroi "côté brûleur". De plus, en haut de la chambre d'expérience, les particules frappant la paroi ont tendance à perdre une partie de leur vitesse et à être réabsorbées vers les carneaux.

I-3.2.7 Validité des "points de repère"

Il semble que les cannes pyrométriques reçoivent directement le jet de fumées, donc si l'on veut mesurer la température des fumées cet emplacement semble judicieux, alors que si l'on veut mesurer la température de voûte la différence entre la température réelle et la température mesurée peut être assez sensible.

I-3.3 Cellule haute avec charge n° 1 (cliché n° 2041 à 2046)

Ici la hauteur correspondante de cellule est de 4 mètres au lieu de 3,60 mètres. Le plan de chargement est identique au cas précédent.

I-3.3.1 Plan 1

De la même manière que précédemment on constate que l'angle d'ouverture du jet est voisin de $9,5^\circ$. Il semble qu'ici l'effet dû à la paroi supérieure soit moins marqué. Le contact jet-voûte

a lieu à 40 cm de la paroi brûleur au lieu de 35. Quant au contact flamme-lingot, il semble être sensiblement le même que dans le cas précédent.

Nous remarquons également un allongement du noyau potentiel : sa longueur est voisine de 6 fois le diamètre de l'injecteur , ceci semble également dû à un effet de paroi moins marqué.

Pour ce qui est de la couche limite à la paroi supérieure, il est toujours aussi difficile d'en voir le développement, mais le tourbillon arrière existe toujours ; cependant, son importance verticale a nettement diminué , il semble que cela soit dû à un développement du jet de manière plus rectiligne et toujours à l'éloignement de la voûte.

D'autre part, l'écoulement a toujours une forme de fer à cheval, mais les deux branches du fer à cheval ont tendance à se rencontrer à hauteur de la partie droite de la tête du lingot 2. Le jet remonte légèrement, ce qui peut expliquer la faible hauteur du tourbillon arrière.

Enfin, la zone de recirculation entre le jet et la voûte est nettement plus marquée que dans le cas précédent.

I-3.3.2 Plan 2

Cette fois, l'angle d'ouverture du jet ne s'est pas accru ; il semble que cela soit dû à l'éloignement de la voûte qui autorise un écoulement en fer à cheval entre le jet et la paroi supérieure et qui dévie l'écoulement principal vers les têtes des lingots 2, 3 et 4. Ainsi, le tourbillon arrière a plus d'importance que dans le plan 1.

Nous avons fixé de manière assez approximative les limites du contact flamme-voûte, alors qu'il est beaucoup plus aisé de fixer les limites des contacts flamme-lingots.

On constate que l'écoulement est fortement contrarié par l'accroissement de la distance axe de l'injecteur-voûte, ce qui donne des lignes de flux assez difficiles à mettre en évidence.

Les points d'impact des deux éléments du jet principal étant variables au cours du temps, il est vraisemblable que le jet oscille dans un plan vertical. Une analyse cinématographique peut le montrer.

I-3.3.3 Plan 3

Le jet principal est visible dans ce plan au droit du lingot 1 et se développe jusqu'à la paroi arrière, il est bien en contact avec les têtes des lingots 2, 3 et 4 ; le tourbillon arrière n'est pratiquement plus visible et a été remplacé par une zone de faibles vitesses.

Nous remarquons également la présence de lignes de courant importantes, qui partent de la voûte et se dirigent vers les carneaux, après avoir frappé la tête du lingot n° 1.

En ce qui concerne les zones de fluide mort entre lingots, nous constatons que la traînée du lingot 4 dans le jet de retour est plus importante que dans le cas du four initial : ceci semble dû à l'absence du tourbillon arrière qui ne dévie pas le jet vers le bas.

La zone de fluide mort entre lingots 1 - 2 est nettement moins importante, c'est la résultante du jet venant de la voûte et dirigé vers les carneaux.

I-3.3.4 Plan 4

Le jet issu de l'injecteur pénètre dans le plan 4 au-dessus du lingot 3. Le cliché a été fait à un instant où le développement du jet était contrarié par la présence de fluide en direction des carneaux. Le jet principal est ici renversé et se dirige vers la paroi avant de la cellule.

Comme dans le plan 2, on remarque l'absence du tourbillon arrière et la présence d'une importante quantité de "fumées" prenant la direction voûte-carneaux et rencontrant le jet principal au-dessus du lingot 1.

Tout comme dans le plan 3, les zones mortes entre les lingots 1, 2 et 2, 3 ont diminué par rapport à la cellule initiale, alors que la traînée du lingot 4 dans le fluide en retour a augmenté. Ce phénomène semble dû à l'absence du tourbillon arrière.

I-3.3.5 Plan 5

Compte tenu de la présence de la zone de fluide mort dans la partie supérieure droite de la cellule, la concentration des lignes de flux est nettement moins importante que dans le cas I-3.2. Par contre, comme dans le plan 4, une importante quantité de fluide en provenance de la voûte est aspirée par les carneaux et déviée de manière nettement moins sensible par la présence des lingots.

De la même façon que dans le cas I-3.2, un tourbillon prend naissance dans la partie supérieure gauche de la cellule.

Enfin, nous noterons un accroissement de la zone morte entre les lingots 1 et 2, augmentation qui peut être due au peu de contrainte que rencontre le jet issu de la voûte et se dirigeant vers les carneaux.

I-3.3.6 Plan 6

Le tourbillon longitudinal mentionné en I-3.2.6 n'existe plus, alors que le tourbillon situé dans la partie supérieure gauche du cliché est considérablement réduit. De plus, nous constatons que la densité des lignes d'émission le long de la paroi, semble inférieure au cas précédent.

I-3.3.7 Validité des points de repère

Il nous a semblé que l'emplacement des cannes pyrométriques est moins bon que dans le cas précédent. En effet, elles se trouvent entre les plans 3 et 4, or à ce niveau, la partie arrière de la cellule se trouve être une zone de fluide mort, donc il y a peu de gaz chaud. Il serait plus judicieux de rapprocher les cannes du plan de symétrie longitudinal de la cellule, afin d'être dans une zone à forte densité de fumées.

I-3.4 Cellule basse avec charge n° 2 (clichés n° 4001 à 4009)

Nous ne mentionnerons plus que les différences avec les cas précédents. Le plan de chargement du four est du type C, décrit à la figure 12.

I-3.4.1 Plan 1

Le demi-angle d'ouverture du jet est ici voisin de $9,5^\circ$. L'espace tête lingot-voûte étant plus important, on se rapproche du

jet libre.

Nous ne voyons pas se former de tourbillon à l'arrière et, la boucle du fer à cheval semble être plus rapprochée de la paroi avant de la maquette.

I-3.4.2 Plan 2

On remarque un élargissement du jet assez sensible dans la partie haute par rapport au plan 1.

De plus, il semble que la boucle du fer à cheval se rapproche de la paroi arrière de la cellule, on note toujours une zone morte dans la partie supérieure droite.

Le contact flamme-voûte est assez important ; en effet, il se produit sur une longueur de paroi de l'ordre de 45 % de la totalité de la voûte. Par contre, les contacts flamme-lingots sont pratiquement nuls.

I-3.4.3 Plan 3

On constate que le jet principal fait son apparition dans ce plan, au droit de la tête du lingot n° 2, et qu'à l'instant du cliché, l'écoulement se produit vers les carneaux. D'autre part, la zone de fluide mort sous la voûte s'amplifie par rapport au plan 2.

Enfin, les zones de fluide mort sont relativement importantes entre les lingots.

I-3.4.4 Plan 4

Le jet est entièrement dirigé vers les carneaux et apparaît au droit du lingot 4.

La zone de fluide mort quant à elle, s'amplifie toujours de même que les trainées des lingots.

I-3.4.5 Plan 5

Comme dans les autres cas, il s'agit pratiquement d'un jet entièrement orienté vers la paroi avant de la cellule. La zone d'apparition du jet dans ce plan est au droit de la partie avant du lingot 4.

La zone morte de la partie supérieure droite existe toujours. Compte tenu de la position légèrement inclinée des lingots par rapport à l'axe longitudinal du four, on note toujours la présence de zones mortes assez importantes.

I-3.4.6 Plan 6

L'écoulement est sensiblement identique au cas I-3.2, bien que la dimension du tourbillon situé dans la partie gauche de la cellule ait diminué .

I-3.4.7 Plan 7

Il s'agit de l'axe du brûleur. On remarque parfaitement la recirculation et, il semble que l'axe du brûleur ne soit pas parfaitement parallèle à l'axe du four : le jet est légèrement dévié vers la gauche ; ceci peut être dû au déséquilibre des pressions aux carneaux, la répartition de chargement n'étant pas symétrique par rapport à l'axe de la cellule (photo 4009).

De même que sur les clichés relatifs aux plans verticaux, on peut voir que la boucle de l'écoulement ne va pas frapper la paroi arrière.

I-3.4.8 Plan 8

Il s'agit de visualisation de l'écoulement dans le plan le plus proche de la voûte. On repère très bien l'impact du jet sur la paroi et son développement. Ce cliché permet de confirmer ce qui a été remarqué dans les plans horizontaux.

I-3.4.9 Plan 9

Il est très difficile de voir ce qui se passe. Néanmoins, le fluide a surtout tendance à s'écouler vers les carneaux en se rapprochant des parois longitudinales.

I-3.4.10 Validité des "points de repère"

Compte tenu du déséquilibre dans le jet (orientation plus marquée vers le côté gauche), il semble que le point de repère droit soit de validité très relative. En effet, il se trouve pratiquement dans une zone de fluide mort (photos 4004, 4005, 4007).

Dans ce cas, il semble que si l'on veut mesurer la température des gaz, on doit changer la position des cannes pyrométriques et les placer, soit sur la voûte relativement loin du brûleur, soit sur les parois longitudinales.

I-3.5 Autres types de chargements

Compte tenu du grand nombre de cas de figures étudiées, il est impossible de donner une étude descriptive pour chaque cellule. Cependant, les clichés relatifs aux cas suivants :

- cellule haute charge n° 2
- cellule basse charge n° 3
- cellule haute charge n° 3
- cellule basse charge n° 4
- cellule haute charge n° 4

figurent dans ce mémoire.

Il est ainsi possible de se rendre compte des différences importantes qui peuvent apparaître d'une cellule à l'autre.

L'étude descriptive de ces divers cas, figure dans un rapport technique [18].

I-4 RESULTATS QUANTITATIFS APPROCHES DEDUITS DES PHOTOGRAPHIES

Au cours des pages précédentes, nous avons tenté de décrire le phénomène. Dans ce qui suit, on essaiera de chiffrer, à partir des clichés obtenus, les différents résultats qu'il est possible de mettre en évidence : longueurs des contacts flamme-voûte et flamme lingots, dimensions des différents tourbillons, zone de fluide mort entre les lingots, intensité de la circulation sur les parois longitudinales et sur les têtes des lingots. De plus, dans les cas dignes d'intérêt, nous étudierons l'emplacement idéal des cannes pyrométriques.

I-4.1 Remarques à propos des tableaux de résultats

Pour chaque cliché, définissons un système d'axes orthonormé, dont l'origine est au coin inférieur gauche de la cellule ; l'axe des x étant horizontal, dirigé vers la paroi arrière de la cellule, l'axe vertical dirigé vers la voûte.

L'erreur absolue lors des mesures faites sur les clichés, est voisine de 2 mm (cliché ayant un grandissement 2, par rapport à

ceux inclus dans ce mémoire), ce qui correspond à environ 10 cm sur le four grandeur réelle. Les différents tableaux donnent les résultats en mètres pour une cellule à l'échelle 1.

Les tableaux 3, 5, 7 et 9 fournissent suivant la formule (16) (chapitre I-4.3.1), un classement, par ordre d'intérêt, des différents cas de figures. Ces tableaux contiennent en colonne :

- 1 - le degré d'intérêt du cas de cellule examiné,
- 2 - le numéro du cas,
- 3 - la valeur du paramètre M (formule 16),
- 4 - la valeur moyenne du contact flamme-voûte, pour les plans de visualisation 1 et 2,
- 5, 6, 7 - les valeurs moyennes des longueurs de contact flamme-lingots, dans les plans 1 et 2, respectivement pour les lingots 1, 2 et 3,
- 8, 9, 10, 11, 12, 13 - les valeurs moyennes de l'importance des zones de fluide mort, respectivement le long de :

- la paroi aval du lingot 1
- la paroi amont du lingot 2
- la paroi aval du lingot 2
- la paroi amont du lingot 3
- la paroi aval du lingot 3
- la paroi amont du lingot 4

Dans chaque plan de visualisation, la paroi amont du lingot n, est la paroi ayant la plus petite abscisse, la paroi aval du lingot n, la face ayant la plus grande abscisse.

- 14, 15 - la dimension longitudinale du four dans sa partie haute et dans sa partie basse,
- 16 - la hauteur de la cellule,
- 17 - l'angle d'inclinaison du brûleur en degrés,
- 18 - l'emploi ou non de déflecteur noté comme suit :

- 0 : absence de déflecteur
- 1 : 4 déflecteurs dont les dimensions sont les suivantes : hauteur 220 cm, profondeur 30 cm et épaisseur 20 cm,
- 2 : 4 déflecteurs dont seule la profondeur est accrue de 20 cm par rapport au cas précédent.

19 - Un accroissement de la distance axe brûleur-sole du four, repère comme suit :

- 0 : aucune modification
- 1 : accroissement de 10 centimètres
- 2 : accroissement de 20 centimètres.

20 - le plan de chargement, conformément à la figure 12.

Les tableaux 4, 6, 8 et 10, scindés en trois parties, donnent par ordre d'intérêt une classification des différents types de cellules utilisés, pour :

- 1° - le contact flamme-voûte,
- 2° - le contact flamme-lingots,
- 3° - les masques entre lingots.

Dans les deux premières colonnes figurent :

- 1° - le numéro du cas,
- 2° - la valeur numérique du paramètre en cause.

Les colonnes suivantes contiennent les différentes dimensions de la cellule, comme les colonnes 14 à 20 des tableaux 3, 5, 7 et 9.

Compte tenu du nombre important de tableaux que cela aurait nécessité, il a été impossible de donner les valeurs des masques dans chaque plan de visualisation, de même que la taille des tourbillons.

Enfin, notons que lorsque les lingots sont placés suivant les positions indiquées en 12 B et 12 C, les masques sont plus importants que ceux indiqués par les photographies. En effet, il est impossible d'observer l'écoulement entre les deux rangées de lingots.

I-4.2 Etude de l'influence des différentes variables sur le fonctionnement de la cellule

Cette étude n'a été réalisée que dans le cas d'une charge 1 constituée de 8 lingots H.B.

I-4.2.1 Rehausse de la voûte

De manière générale, on peut dire que jusqu'à une hauteur de cellule de 390 mm, la rehausse entraîne une diminution du contact flamme-voûte, tant dans le plan 1 que dans le plan 2. Puis

pour une hauteur de chambre d'expérience de 400 mm, la longueur du contact flamme-voûte croît. De même, on remarque un accroissement des contacts flamme-lingots avec l'accroissement de la hauteur de cellule, surtout dans le plan 1.

En bout de cellule, le tourbillon a tendance à passer par un minimum de dimension pour une hauteur de 380 mm.

Il est très délicat de mettre en évidence des faits précis en ce qui concerne les zones de fluide mort, (masque entre les lingots). Cependant, on peut dire que la hauteur de la cellule a peu d'influence (dans la plupart des cas) sur cette zone, relative à la paroi aval du lingot 2.

I-4.2.2 Inclinaison de l'injecteur

Comparons les résultats obtenus dans deux cas de figure où, seul l'angle d'inclinaison de l'injecteur varie (0 et 2 degrés), pour constater que :

a) l'importance du contact flamme-voûte croît dans tous les cas, dans les plans 1 et 2.

b) dans le plan 1, on remarque une décroissance des zones de contact entre la flamme et les lingots, alors que dans le plan 2, il est assez difficile de se prononcer. Ce phénomène semble, en effet, dépendre de nombreux paramètres. L'augmentation de l'angle d'inclinaison de l'injecteur peut ne pas avoir les mêmes conséquences, dans le cas d'une cellule de 360 mm de haut, que dans le cas d'une chambre d'expérience de 400 mm de hauteur.

c) cette inclinaison du brûleur provoque dans la plupart des cas (75 %), une diminution du tourbillon situé dans le coin supérieur droit de la maquette.

d) il est assez difficile de faire ressortir un phénomène général en ce qui concerne les masques entre les lingots dans les plans 3, 4 et 5. Néanmoins un examen des zones de fluide mort entre lingots, montre que :

- les zones de très basses vitesses relatives aux parois aval des lingots 1 et 2 dans le plan 3 et des parois amont des lingots 3, 4, 2 respectivement dans les plans 3, 4, 5, croissent dans la plupart des cas.

- les zones de fluide mort correspondant aux faces amont des lingots 3, 4 et à la face aval du lingot 3, ne varient pas.

- dans tous les autres cas, l'influence de l'angle de l'injecteur semble aléatoire.

I-4.2.3 Augmentation de la distance "axe du brûleur-sole du four"

Dans les plans 1 et 2, une augmentation de ce paramètre entraîne :

- un léger accroissement de la longueur du contact flamme-voûte, surtout dans le plan 2,

- une décroissance assez sensible de l'importance des zones de contact flamme-lingots,

- une variation aléatoire de l'amplitude du tourbillon arrière.

Dans les autres plans, nous avons remarqué que cet accroissement correspond à :

- une augmentation des zones de fluide mort le long des parois amont :

- des lingots 2, 3 dans le plan 4,
- du lingot 1 dans le plan 5,
- du lingot 2 dans le plan 4 ;

- une décroissance de ces mêmes zones le long des parois amont :

- des lingots 2 et 3 dans le plan 3,
- du lingot 4 dans le plan 4,
- de la paroi aval du lingot 3 dans le plan 4 ;

- dans tous les autres cas, on a : soit une variation aléatoire de ces zones (paroi amont du lingot 4 et paroi aval du lingot 3 dans le plan 4), soit aucun changement.

I-4.2.4 Influence de la présence des déflecteurs

Dans le plan 1, pour une hauteur de cellule inférieure à 380 millimètres, on remarque un accroissement des longueurs des

contacts flamme-voûte et flamme-lingots ainsi que de l'amplitude du tourbillon arrière. Pour une hauteur de cellule supérieure, les phénomènes sont inversés.

Dans le plan 2, on remarque :

- une décroissance de l'importance du contact flamme-voûte,
- une diminution de celui relatif aux lingots,
- une variation aléatoire du tourbillon.

D'autre part, la majorité des zones de fluide mort le long des parois des lingots, diminue assez sensiblement, sauf en ce qui concerne la paroi aval du lingot 2.

I-4.2.5 Allongement de la cellule

Dans les deux premiers plans, on remarque une variation complètement aléatoire de toutes les grandeurs caractéristiques. Il semble en être de même pour les zones de fluide mort.

I-4.3 Conclusions techniques

Il est nécessaire de déterminer pour chaque charge, l'optimum en ce qui concerne :

- 1° - la longueur du contact flamme-voûte pour les plans 1 et 2,
- 2° - la longueur des contacts flamme-têtes des lingots dans les plans 1 et 2,
- 3° - l'importance des masques entre les lingots.

Puis, pour chaque charge, on classera par ordre d'intérêt les différents types de cellules et de plan de chargement utilisés. L'optimum sera obtenu si :

- 1° - l'importance du contact flamme-voûte est minime, de manière à ne pas détériorer les réfractaires,
- 2° - la longueur du contact flamme-lingots est la plus faible possible, pour éviter une surchauffe locale,
- 3° - les masques entre lingots sont les plus faibles possibles, de telle sorte que l'échange thermique par convection entre les fumées et les lingots soit le plus grand possible.

Pour ce faire, on cherche le minimum de :

$$M = A_1^1 + A_1^2 + \sum_{i=1}^3 (B_1^i + B_2^i) \times 2,5 + \left[\sum_{k=1}^6 \frac{(c_3^k + c_4^k + c_5^k)}{N_k} \right] / 1,5 \quad , \quad (16)$$

où :

- A_1^1 est la longueur du contact flamme-voûte dans le plan de visualisation 1
- A_1^2 est la longueur du contact flamme-voûte dans le plan de visualisation 2
- B_1^i, B_2^i sont les longueurs des contacts flamme-(lingot i), mesurées dans les plans de visualisation 1 et 2
- c_i^k la hauteur de la zone de fluide mort le long de la paroi k dans le plan de visualisation i.

- Si
- $k = 1$ il s'agit de la paroi aval du lingot 1,
 - $k = 2$ paroi amont du lingot 2,
 - $k = 3$ paroi aval du lingot 2,
 - $k = 4$ paroi amont du lingot 3,
 - $k = 5$ paroi aval du lingot 3,
 - $k = 6$ paroi amont du lingot 4,
- N_k est le nombre de plan de visualisation où est présente la paroi k.

Dans cette formule, nous donnons la plus grande importance aux surchauffes locales des lingots, ce qui nous est apparu comme le phénomène primordial. En effet, il faut éviter à tout prix que les têtes des lingots coulent.

Le transfert thermique par rayonnement étant supérieur au transfert par convection, il semble qu'un plafond à température élevée contribue de manière importante au réchauffement de la charge. Cependant, l'échange par convection entre les fumées et les faces des lingots n'est pas négligeable. C'est pour ces deux raisons que les coefficients relatifs à ces deux paramètres sont voisins dans la formule (16).

I-4.3.1 Charge 1

I-4.3.1.1 Etude du contact flamme-voûte (tabl. 4)

Le minimum est obtenu pour une cellule rehaussée de 20 centimètres (échelle 1) et allongée de la même quantité.

LE CONTACT FLAMME VOUTE				LE CONTACT FLAMME TETES DES LINGOTS				LES MASQUES DES FACES DES LINGOTS			
Cas N°	M ₁	Dimensions de la Cellule		Cas N°	M ₂	Dimensions de la Cellule		Cas N°	M ₃	Dimensions de la Cellule	
714	0.00	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	0	2	2.11	8.00
254	0.05	8.20	8.20	3.90	0.00	1	0	3	2.18	8.00	8.00
704	0.17	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	0	2.36	8.00	8.00
321	0.27	8.00	8.00	3.80	0.00	2	0	0	2.40	8.00	8.00
712	0.37	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	0	2.40	8.00	8.00
716	0.40	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2	0	2.58	8.00	8.00
256	0.45	8.20	8.20	3.80	0.00	0	1	0	2.64	8.00	8.00
301	0.50	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	0	2.70	8.00	8.00
322	0.60	8.00	8.00	4.00	0.00	1	0	0	2.79	8.00	8.00
218	0.67	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2	0	2.80	8.00	8.00
320	0.70	8.00	8.00	3.60	0.00	2	0	0	2.85	8.00	8.00
216	0.77	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	0	3.10	8.00	8.00
250	0.77	8.20	8.20	4.00	0.00	1	2	0	3.13	8.00	8.00
212	0.90	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	0	3.18	8.00	8.00
257	0.90	8.20	8.20	3.80	2.00	0	1	0	3.23	8.00	8.00
715	0.95	8.20	8.20	4.00	1.50	0	0	0	3.25	8.00	8.00
206	1.00	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	0	3.38	8.00	8.00
226	1.07	8.20	8.40	4.00	0.00	0	0	0	3.45	8.00	8.00
228	1.12	8.20	8.40	4.00	0.00	0	2	0	3.50	8.00	8.00
713	1.20	8.20	8.20	3.80	1.50	0	0	0	3.51	8.00	8.00
705	1.27	8.00	8.00	4.00	1.50	0	0	0	3.54	8.00	8.00
208	1.30	8.00	8.00	4.00	0.00	0	2	0	3.60	8.00	8.00
202	1.30	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	0	3.64	8.00	8.00
318	1.32	8.20	8.20	3.60	1.50	1	1	0	3.93	8.00	8.00
214	1.35	8.20	8.20	3.90	0.00	0	0	0	4.25	8.00	8.00
207	1.37	8.00	8.00	4.00	2.00	0	0	0	4.55	8.00	8.00
204	1.45	8.00	8.00	3.90	0.00	0	0	0	4.60	8.00	8.00
225	1.45	8.20	8.40	3.90	2.00	0	0	0	4.78	8.00	8.00
200	1.47	8.00	8.00	3.60	0.00	0	0	0	4.95	8.00	8.00
227	1.52	8.20	8.40	4.00	2.00	0	0	0	5.20	8.00	8.00
217	1.65	8.20	8.20	4.00	2.00	0	0	0	5.39	8.00	8.00
222	1.70	8.20	8.40	3.80	0.00	0	0	0	5.50	8.00	8.00
213	1.75	8.20	8.20	3.80	2.00	0	0	0	5.56	8.00	8.00
224	1.75	8.20	8.40	3.90	0.00	0	0	0	5.57	8.00	8.00
215	1.80	8.20	8.20	3.90	2.00	0	0	0	5.61	8.00	8.00
711	1.80	8.20	8.20	3.60	1.50	0	0	0	5.71	8.00	8.00
260	1.85	8.20	8.20	3.60	0.00	1	1	0	5.84	8.00	8.00
312	1.87	8.00	8.00	4.00	0.00	2	0	0	5.96	8.00	8.00
706	1.87	8.00	8.00	4.00	0.00	0	2	0	6.02	8.00	8.00
311	1.90	8.00	8.00	3.80	0.00	1	0	0	6.07	8.00	8.00
710	1.90	8.20	8.20	3.60	0.00	0	0	0	6.21	8.00	8.00
302	1.97	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	0	6.41	8.00	8.00
310	2.00	8.00	8.00	3.60	0.00	1	0	0	6.41	8.00	8.00
220	2.02	8.20	8.40	3.60	0.00	0	0	0	6.52	8.00	8.00
316	2.07	8.20	8.20	3.60	0.00	1	0	0	6.53	8.00	8.00
317	2.10	8.20	8.20	3.60	0.00	1	0	0	6.55	8.00	8.00
205	2.12	8.00	8.00	3.90	2.00	0	0	0	6.60	8.00	8.00
219	2.15	8.20	8.20	4.00	2.00	0	2	0	6.70	8.00	8.00
252	2.22	8.20	8.20	4.00	0.00	1	0	0	6.97	8.00	8.00
210	2.27	8.20	8.20	3.60	0.00	0	0	0	7.18	8.00	8.00

258	2.33	8.20	8.20	3.60	0.00	I	0	R	226	1.45	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	A	202	7.91	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	A
300	2.37	8.00	8.00	3.60	0.00	I	0	R	256	1.45	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	A	711	8.01	8.20	8.20	3.60	1.50	0	0	C
209	2.37	8.00	8.00	4.00	2.00	0	2	A	702	1.50	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	A	715	8.10	8.20	8.20	4.00	1.50	0	0	C
702	2.40	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	A	713	1.50	8.20	8.20	3.80	1.50	0	0	C	714	8.21	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	C
223	2.40	8.20	8.40	3.80	2.00	0	0	A	714	1.55	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	C	703	8.25	8.00	8.00	3.80	1.50	0	0	C
313	2.45	8.00	8.00	3.60	1.50	I	0	B	312	1.60	8.00	8.00	4.00	0.00	2	0	B	706	8.25	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	C
201	2.47	8.00	8.00	3.60	2.00	0	0	A	301	1.62	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	B	227	8.27	8.20	8.40	4.00	2.00	0	0	A
221	2.50	8.20	8.40	3.60	2.00	0	0	A	703	1.65	8.00	8.00	3.80	1.50	0	0	B	225	8.30	8.20	8.40	3.90	2.00	0	0	A
211	2.60	8.20	8.20	3.60	2.00	0	0	A	705	1.72	8.00	8.00	4.00	1.50	0	0	C	716	8.33	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2	A
259	2.62	8.20	8.20	3.60	2.00	I	0	R	316	1.75	8.20	8.20	3.60	0.00	I	0	C	228	8.50	8.20	8.40	4.00	0.00	0	2	A
262	2.80	8.20	8.20	3.60	0.00	I	2	R	302	1.75	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	R	219	8.76	8.20	8.20	4.00	2.00	0	2	A
700	2.82	8.00	8.00	3.60	1.50	0	0	C	701	1.75	8.00	8.00	3.60	0.00	0	0	C	705	8.78	8.00	8.00	4.00	1.50	0	0	C
701	2.82	8.00	8.00	3.60	1.50	0	0	C	704	1.75	8.00	8.00	3.60	1.50	0	0	C	224	9.12	8.20	8.40	3.90	0.00	0	0	A
315	2.92	8.00	8.00	3.60	1.50	I	1	R	319	1.75	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	C	713	9.41	8.20	8.20	3.80	1.50	0	0	C
261	3.05	8.20	8.20	3.60	2.00	I	1	R	712	2.02	8.00	8.00	3.60	0.00	I	0	R	702	10.40	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	C
263	3.05	8.20	8.20	3.60	2.00	I	1	R	712	2.02	8.20	8.20	3.80	0.00	I	0	C	229	10.58	8.20	8.40	4.00	2.00	0	0	A

TABLEAU 4

D'autre part, l'inclinaison du brûleur semble néfaste à l'optimisation de ce paramètre. En effet, les différents cas où l'injecteur est incliné de 1,5 ou 2 degrés sont situés en fin du tableau 4.

Les cas de figures les plus intéressants sont obtenus pour :

- 1° - une hauteur de cellule supérieure ou égale à 3,80 m,
- 2° - un four allongé de 20 centimètres, dans la plupart des cas,
- 3° - des plans de chargement type B ou C. De plus, l'introduction de déflecteurs n'influe pas de manière notable sur ce paramètre.

Enfin, la géométrie et le plan de chargement actuel de la cellule ne semblent pas convenir.

I-4.3.1.2 Etude du contact flamme-lingots (tabl. 4)

Les meilleurs résultats sont donnés pour un plan de chargement du type A, il semble que la disposition des lingots joue ici un rôle primordial.

De plus, pour les 3 cas de figures les plus intéressants, la distance axe du brûleur-sole du four est supérieure de 20 centimètres à celle actuellement utilisée.

Un accroissement de la hauteur de la cellule paraît également souhaitable. Par contre, les déflecteurs semblent augmenter la longueur des contacts flamme-lingots.

I-4.3.1.3 Etude des masques des lingots

Dans le tableau 4 nous donnons l'évolution du paramètre :

$$M_3 = \sum_{k=1}^6 \left(\frac{c_3^k + c_4^k + c_5^k}{N_k} \right)$$

pour les différents types de cellules utilisés.

Nous constatons que :

1° - la présence de déflecteurs du premier ou du deuxième type diminue considérablement les masques entre lingots.

2° - la répartition géométrique de la charge semble jouer un très grand rôle. Le plan de chargement B est le plus rentable, tandis qu'un positionnement du type C donne les plus mauvais résultats. Cependant, le plan de chargement B est associé à la présence de déflecteurs ; il est très difficile de dire si la répartition géométrique de la charge a une influence primordiale sur l'importance des masques entre lingots.

3° - les six cas les plus favorables sont obtenus pour des chambres d'expériences de 8 mètres et pour une inclinaison de l'injecteur nulle.

4° - la hauteur du four ne semble pas jouer un rôle primordial.

I-4.3.1.4. Etude globale d'après la formule (16)

Les résultats de cette étude sont donnés dans les trois premières colonnes du tableau 3 .

Nous constatons que :

1° - le plan de chargement A est le plus intéressant, alors que la répartition des lingots actuellement utilisée (C) est la plus défavorable.

2° - une rehausse de la cellule semble indispensable. En effet, les 7 cas optimums sont obtenus pour des hauteurs de four supérieures ou égales à 3,80 mètres.

3° - la présence de déflecteurs ne semble pas indispensable. Ceci peut être dû à la formule employée pour déterminer l'optimum.

4° - le four et la répartition géométrique actuelle figure en fin de tableau. Il s'agit donc d'une cellule qui ne peut donner satisfaction.

[illegible]

	Cas N	M	contact flamme voûte plans 1 et 2	contact flamme l'ingot 1 plans 1 et 2	contact flamme l'ingot 2 plans 1 et 2	contact flamme plans 1 et 2	masque paroi aval du l'ingot 1	masque paroi aval du l'ingot 2	masque paroi aval du l'ingot 3	masque paroi aval du l'ingot 3	masque paroi aval du l'ingot 3	masque paroi aval du l'ingot 4	longueur de la cellule	partie haute	longueur de la cellule	partie basse	hauteur de la cellule	mélange du brûleur	détecteurs	brûleur	chargement
1	218	6.11	0.67	0.09	0.00	0.15	0.48	1.06	0.00	1.80	0.87	0.00	8.20	8.20	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2	A
2	207	6.71	1.37	0.09	0.00	0.05	0.36	1.75	0.00	2.00	0.27	1.17	8.00	8.00	8.00	8.00	4.00	2.00	0	0	A
3	208	6.95	1.30	0.00	0.00	0.00	0.55	2.00	0.00	2.02	1.02	0.02	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	0.00	0	2	A
4	228	7.91	1.12	0.00	0.00	0.00	1.25	2.05	0.77	2.12	0.97	0.72	8.20	8.20	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2	A
5	215	7.94	1.80	0.00	0.00	0.15	0.41	1.55	0.17	2.02	0.27	0.85	2.20	2.20	2.20	2.20	3.00	2.00	0	0	A
6	212	7.95	0.90	0.00	0.30	0.00	0.62	1.81	0.47	1.72	0.95	1.32	8.20	8.20	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	A
7	318	7.96	1.32	0.00	0.00	0.30	1.36	0.90	0.45	1.23	0.30	1.46	8.20	8.20	8.20	8.20	3.60	1.50	1	1	B
8	320	8.25	0.70	0.00	0.75	0.30	1.02	0.15	0.65	0.51	0.00	0.00	8.00	8.00	8.00	8.00	3.60	0.00	2	0	B
9	202	8.25	1.30	0.00	0.07	0.00	1.35	1.76	0.72	1.60	1.20	1.27	8.00	8.00	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	A
10	313	8.26	2.45	0.00	0.00	0.30	0.60	0.61	0.23	1.21	0.13	0.00	8.00	8.00	8.00	8.00	3.60	1.50	1	0	B
11	254	8.76	0.05	0.00	1.00	0.30	0.00	0.66	0.43	0.76	0.00	1.38	8.20	8.20	8.20	8.20	3.90	0.00	1	0	R
12	222	9.08	1.70	0.00	0.20	0.30	1.03	1.65	0.00	1.57	0.00	0.52	8.20	8.20	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	A
13	213	9.09	1.75	0.00	0.00	0.07	1.51	2.13	0.00	2.07	0.99	1.20	8.20	8.20	8.20	8.20	3.80	2.00	0	0	A
14	321	9.11	0.27	0.10	0.70	0.30	0.35	0.53	0.66	1.11	0.80	1.13	8.00	8.00	8.00	8.00	3.80	0.00	2	0	R
15	322	9.19	0.60	0.00	0.82	0.30	0.55	0.26	0.45	0.58	0.50	1.20	8.00	8.00	8.00	8.00	4.00	0.00	1	0	B
16	216	9.22	0.77	0.00	0.57	0.15	0.86	1.33	0.00	1.92	0.82	1.12	8.20	8.20	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	A
17	205	9.25	2.12	0.00	0.25	0.30	0.42	1.40	0.00	0.76	0.00	0.73	8.00	8.00	8.00	8.00	3.90	2.00	0	0	A
18	225	9.43	1.45	0.00	0.00	0.20	1.60	2.16	0.80	2.97	0.80	0.80	8.20	8.20	8.20	8.20	3.90	2.00	0	0	A
19	262	9.61	2.80	0.00	0.15	0.30	0.00	0.18	0.35	1.05	0.00	1.06	8.20	8.20	8.20	8.20	3.60	0.00	1	2	R
20	211	9.66	2.60	0.00	0.00	0.15	0.60	1.98	0.00	2.02	0.00	0.00	2.20	2.20	2.20	2.20	3.60	2.00	0	0	A
21	201	9.67	2.47	0.00	0.00	0.15	1.18	1.23	0.57	1.75	0.00	1.22	8.00	8.00	8.00	8.00	3.60	2.00	0	0	A
22	204	9.79	1.45	0.00	0.25	0.30	1.30	1.66	0.00	2.05	0.35	0.85	8.00	8.00	8.00	8.00	3.90	0.00	0	0	A
23	250	10.25	0.77	0.00	0.87	0.30	0.15	0.66	0.41	1.55	0.99	1.46	8.20	8.20	8.20	8.20	4.00	0.00	1	2	B
24	221	10.26	2.50	0.00	0.00	0.15	1.25	1.91	0.00	1.57	0.82	1.20	8.20	8.20	8.20	8.20	3.60	2.00	0	0	A
25	200	10.27	1.47	0.00	0.08	0.72	1.18	1.91	0.00	1.77	0.99	0.97	2.90	2.90	2.90	2.90	3.60	0.00	0	0	A
26	286	10.28	1.00	0.00	0.90	0.15	0.58	1.41	0.00	0.91	0.20	1.53	8.00	8.00	8.00	8.00	3.60	0.00	0	0	A

20	15	10.55	0.45	0.00	1.15	0.30	0.31	0.38	0.28	0.31	0.00	1.20	3.20	8.20	3.20	0.00	0
30	257	10.84	0.90	0.00	0.77	0.30	1.26	0.35	0.70	1.59	0.23	1.16	3.00	8.20	3.00	0.00	0
31	219	10.89	0.15	0.00	0.00	0.15	1.65	0.16	0.20	2.00	1.25	1.50	8.20	8.20	4.00	2.00	0
32	217	10.94	1.65	0.00	0.45	0.30	0.26	1.60	0.00	1.87	1.05	1.05	8.20	8.20	4.00	2.00	0
33	301	11.02	0.50	0.17	1.15	0.30	0.55	0.36	0.18	1.15	0.00	0.00	8.00	8.00	3.80	0.00	0
34	210	11.16	2.27	0.00	0.35	0.22	0.91	1.35	0.00	2.00	0.00	0.85	8.20	8.20	3.50	0.00	0
35	209	11.35	2.37	0.00	0.30	0.15	0.70	2.13	0.00	2.15	0.52	1.02	8.00	8.00	4.00	2.00	0
36	223	11.43	2.40	0.00	0.12	0.15	1.63	1.30	0.45	1.70	1.40	1.40	8.20	8.40	3.80	2.00	0
37	317	11.48	2.10	0.00	0.72	0.30	0.36	0.18	0.28	1.20	0.00	1.20	8.20	8.20	3.50	0.00	0
38	229	11.65	2.30	0.00	0.00	0.00	1.33	2.15	1.12	2.15	2.00	1.82	8.20	8.40	4.00	2.00	0
39	314	11.77	1.17	0.00	0.81	0.30	0.3	0.05	0.25	1.75	0.00	0.00	8.00	8.00	3.00	2.00	0
40	258	12.10	0.00	0.00	0.81	0.15	0.00	0.18	0.50	0.00	0.00	1.05	8.35	8.30	3.50	3.00	0
41	214	12.19	1.35	0.00	1.07	0.30	0.70	1.23	0.28	1.06	0.00	0.65	8.20	8.20	3.90	0.00	0
42	227	12.31	1.50	0.00	0.45	0.30	1.18	1.06	1.00	2.10	0.00	0.00	8.20	8.40	4.00	3.00	0
43	258	12.50	2.35	0.00	0.00	0.30	0.00	0.40	0.23	1.33	0.00	0.73	8.20	8.20	3.60	0.00	0
44	711	12.94	1.80	0.00	0.55	0.25	0.98	1.38	1.70	2.00	0.00	1.06	8.20	8.20	3.60	1.50	0
45	220	12.95	2.02	0.00	0.62	0.30	1.26	1.85	0.72	1.72	0.00	0.85	8.20	8.40	3.60	0.00	0
46	312	13.20	1.87	0.30	1.00	0.30	0.36	0.28	0.26	0.53	0.00	0.73	8.00	8.00	4.00	0.00	0
47	714	13.22	0.00	0.17	1.12	0.25	1.26	0.40	1.75	1.01	1.16	1.73	8.20	8.20	4.00	0.00	0
48	716	13.35	0.40	0.00	1.15	0.25	1.21	1.53	1.58	1.80	0.00	1.51	8.20	8.20	4.00	0.00	0
49	263	13.38	1.85	0.00	1.13	0.30	0.23	0.73	0.66	0.65	0.00	1.06	8.20	8.20	3.60	0.00	0
50	315	13.40	2.92	0.00	0.75	0.30	0.71	0.45	0.35	1.40	0.25	0.28	8.00	8.00	3.60	1.50	0
51	300	13.45	2.37	0.00	1.12	0.30	0.70	0.80	0.00	0.86	0.00	0.00	8.00	8.00	3.50	0.00	0
52	252	13.54	2.22	0.00	1.05	0.30	0.20	0.38	0.48	1.25	0.00	1.20	8.20	8.20	4.00	0.00	0
53	220	13.67	1.07	0.00	1.15	0.30	1.06	1.70	1.06	1.00	0.00	0.70	8.20	8.10	3.50	0.00	0
54	203	13.70	2.27	0.00	0.65	0.30	0.48	1.45	0.00	1.75	1.30	1.02	8.00	8.00	3.80	0.00	0
55	704	13.88	0.17	0.00	1.15	0.60	0.60	0.61	1.71	1.07	1.70	1.03	8.00	8.00	3.00	0.00	0
56	705	14.00	0.00	0.00	1.15	0.25	1.0	1.01	0.00	1.00	0.00	1.00	8.00	8.00	3.50	0.00	0
57	203	14.70	3.00	0.00	1.15	0.10	1.00	0.73	0.00	1.00	0.00	1.00	8.00	8.00	3.00	0.00	0
58	203	14.70	1.00	0.30	1.15	0.30	1.15	0.43	0.00	0.00	0.00	1.00	8.00	8.00	3.00	0.00	0
59	206	14.90	1.37	0.00	0.55	0.60	1.13	0.30	1.81	1.00	1.00	1.00	8.00	8.00	4.00	0.00	0

61	316	15.23	2.07	0.30	1.15	0.30	0.81	1.03	0.66	0.38	0.00	0.00	0.00	8.20	8.20	3.60	0.00	1	0 B
62	712	16.00	0.37	0.62	1.15	0.25	1.13	1.16	1.40	1.58	0.75	1.66	0.00	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0 C
63	710	16.01	1.90	0.00	1.15	0.25	1.36	1.65	1.45	1.66	0.65	1.03	0.00	8.20	8.20	3.60	0.00	0	0 C
64	713	16.17	1.20	0.22	1.02	0.25	0.91	1.53	1.86	1.88	1.20	2.01	0.00	8.20	8.20	3.80	1.50	0	0 C
65	224	16.45	1.75	0.00	1.07	0.30	1.43	1.71	1.15	1.85	1.57	1.40	0.00	8.40	8.40	3.90	0.00	0	0 A
66	705	17.03	1.27	0.00	1.12	0.60	1.55	0.85	1.63	1.91	1.05	1.78	0.00	8.00	8.00	4.00	1.50	0	0 C
67	700	17.86	2.82	0.00	1.15	0.60	0.11	0.00	1.45	1.25	0.85	1.53	0.00	8.00	8.00	3.60	0.00	0	0 C
68	703	18.35	2.30	0.00	1.05	0.60	1.56	0.70	1.48	1.63	1.13	1.73	0.00	8.00	8.00	3.80	1.50	0	0 C
69	701	18.76	2.82	0.00	1.15	0.60	0.73	0.00	1.63	1.98	0.41	1.78	0.00	8.00	8.00	3.60	1.50	0	0 C
70	702	19.23	2.40	0.00	0.90	0.60	1.66	1.73	2.03	2.05	1.46	1.45	0.00	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0 C

TABLEAU 3

5° - le meilleur fonctionnement devrait être obtenu pour une cellule allongée de 20 cm, rehaussée de la même longueur, dont la distance axe du brûleur-sole du four est accrue de 20 cm et utilisant une répartition géométrique de la charge suivant le schéma A de la figure 12.

I-4.3.2 Charge 2

Compte tenu de la dimension longitudinale des lingots et de l'emplacement des déflecteurs, il a été impossible d'étudier les cellules de 8 mètres, équipées de déflecteurs.

I-4.3.2.1 Etude du contact flamme-voûte

Classons les divers types de cellules utilisées par ordre d'intérêt (tableau 6), on constate que :

1° - une rehausse d'au moins 20 mm de la maquette, favorise l'évolution de ce paramètre.

2° - dans la plupart des cas situés en haut du tableau, la longueur du four est de 8,20 mètres.

3° - l'inclinaison du brûleur de 1,5°, entraîne un accroissement de la zone de la voûte directement en contact avec la flamme.

4° - la présence des déflecteurs n'influe pas de manière notable sur ce paramètre.

I-4.3.2.2 Etude du contact flamme-lingots

Comme la précédente, cette étude est résumée dans le tableau 6.

De la même manière que pour la charge 1 :

1° - le plan de chargement A est le plus apte à la minimisation de ce paramètre.

2° - la présence de déflecteurs accroît le contact flamme-lingots.

Par contre, une rehausse de la maquette ne semble pas indispensable (cas 430, 431, 462, 463). Cette conclusion semble logique, compte tenu de la faible hauteur des lingots.

CLASSEMENT PAR ORDRE D'INTERET EN CE QUI CONCERNE

LE CONTACT FLAMME VOUTE			LE CONTACT FLAMME TETES DES LINGOTS			LES MASQUES DES FACES DES LINGOTS		
Cas N°	M ₁	Dimensions de la Cellule	Cas N°	M ₂	Dimensions de la Cellule	Cas N°	M ₃	Dimensions de la Cellule
434	0.00	8.20 8.20 4.00 0.00	462	0.00	8.20 8.20 3.60 0.00	462	3.45	8.20 8.20 3.60 0.00
424	0.00	8.00 8.00 4.00 0.00	463	0.00	8.20 8.20 3.60 2.00	463	3.95	8.20 8.20 3.60 2.00
477	0.32	8.20 8.20 4.00 0.00	426	0.00	8.00 8.00 4.00 0.00	473	4.28	8.20 8.20 3.80 1.50
473	1.07	8.20 8.20 3.80 1.50	430	0.00	8.20 8.20 3.60 0.00	472	4.30	8.20 8.20 3.80 0.00
416	1.37	8.20 8.20 4.00 0.00	431	0.00	8.20 8.20 3.60 1.50	461	4.40	8.20 8.20 3.60 2.00
432	1.47	8.20 8.20 3.80 0.00	435	0.00	8.20 8.20 4.00 1.50	414	4.45	8.20 8.20 4.00 0.00
412	1.47	8.20 8.20 3.80 0.00	436	0.00	8.20 8.20 4.00 0.00	475	4.85	8.20 8.20 3.90 0.00
458	1.50	8.20 8.20 3.60 0.00	413	0.00	8.20 8.20 3.60 1.50	493	4.93	8.20 8.20 3.60 1.50
435	1.50	8.20 8.20 4.00 1.50	420	0.00	8.00 8.00 3.60 0.00	459	5.18	8.20 8.20 3.80 1.50
436	1.57	8.20 8.20 4.00 0.00	421	0.00	8.00 8.00 3.60 1.50	410	5.50	8.20 8.20 3.60 0.00
475	1.60	8.20 8.20 3.90 0.00	422	0.00	8.00 8.00 3.80 0.00	460	5.53	8.20 8.20 3.60 0.00
433	1.60	8.20 8.20 3.80 1.50	423	0.00	8.00 8.00 3.80 1.50	477	5.66	8.20 8.20 4.00 0.00
423	1.60	8.00 8.00 3.80 1.50	461	0.05	8.20 8.20 3.60 2.00	458	5.95	8.20 8.20 3.60 0.00
426	1.77	8.00 8.00 4.00 0.00	411	0.12	8.20 8.20 3.60 1.50	415	5.95	8.20 8.20 4.00 1.50
415	1.82	8.00 8.20 4.00 1.50	460	0.15	8.20 8.20 3.60 0.00	406	6.06	8.00 8.00 4.00 0.00
404	1.87	8.00 8.00 4.00 0.00	433	0.15	8.20 8.20 3.80 1.50	416	6.15	8.20 8.20 4.00 0.00
422	1.87	8.00 8.00 3.80 0.00	415	0.22	8.20 8.20 4.00 1.50	420	6.30	8.00 8.00 3.60 0.00
425	1.87	8.00 8.00 4.00 1.50	425	0.32	8.00 8.00 4.00 1.50	411	6.33	8.20 8.20 3.60 1.50
472	1.95	8.20 8.20 3.80 0.00	434	0.35	8.20 8.20 4.00 0.00	402	6.55	8.00 8.00 3.80 0.00
414	2.15	8.20 8.20 4.00 0.00	432	0.37	8.20 8.20 3.80 0.00	425	7.04	8.00 8.00 4.00 1.50
430	2.17	8.20 8.20 3.60 0.00	412	0.50	8.20 8.20 3.80 0.00	412	7.11	8.20 8.20 3.80 0.00
406	2.22	8.00 8.00 4.00 0.00	410	0.50	8.20 8.20 3.60 0.00	422	7.48	8.00 8.00 3.80 0.00
402	2.30	8.00 8.00 3.80 0.00	459	0.55	8.20 8.20 3.60 1.50	401	7.93	8.00 8.00 3.60 1.50
403	2.37	8.00 8.00 3.80 1.50	414	0.67	8.20 8.20 4.00 0.00	434	7.96	8.20 8.20 4.00 0.00
431	2.42	8.20 8.20 3.60 1.50	401	0.80	8.00 8.00 3.60 1.50	421	8.10	8.00 8.00 3.60 1.50
410	2.42	8.20 8.20 3.60 0.00	402	0.80	8.00 8.00 3.80 0.00	435	8.21	8.20 8.20 4.00 1.50
461	2.45	8.20 8.20 3.60 2.00	475	0.87	8.20 8.20 3.60 0.00	436	8.44	8.20 8.20 4.00 0.00
405	2.45	8.00 8.00 4.00 1.50	472	0.92	8.20 8.20 3.80 0.00	424	8.51	8.00 8.00 4.00 0.00
420	2.57	8.00 8.00 3.60 0.00	458	1.00	8.20 8.20 3.60 0.00	430	8.58	8.20 8.20 3.60 0.00
413	2.60	8.20 8.20 3.80 1.50	406	1.00	8.00 8.00 4.00 0.00	433	8.62	8.20 8.20 3.80 1.50
459	2.62	8.20 8.20 3.60 1.50	424	1.05	8.00 8.00 4.00 0.00	431	8.67	8.20 8.20 3.60 1.50
411	2.92	8.20 8.20 3.60 1.50	405	1.07	8.00 8.00 4.00 1.50	423	8.72	8.00 8.00 3.80 1.50
421	2.95	8.00 8.00 3.60 1.50	477	1.12	8.20 8.20 4.00 0.00	426	8.80	8.00 8.00 4.00 0.00
460	3.02	8.20 8.20 3.60 0.00	403	1.20	8.00 8.00 3.80 1.50	432	8.80	8.20 8.20 3.80 0.00
400	3.25	8.00 8.00 3.60 0.00	400	1.25	8.00 8.00 3.60 0.00	404	8.91	8.00 8.00 3.80 1.50
462	3.27	8.20 8.20 3.60 0.00	404	1.30	8.00 8.00 4.00 0.00	403	8.93	8.00 8.00 4.00 0.00
401	3.40	8.00 8.00 3.60 1.50	473	1.35	8.20 8.20 3.80 1.50	400	9.15	8.00 8.00 3.60 0.00
463	3.60	8.20 8.20 3.60 2.00	416	1.72	8.20 8.20 4.00 0.00	405	9.61	8.00 8.00 4.00 1.50

TABLEAU 6

Enfin, 12 types de cellules donnent les mêmes résultats : le contact flamme-tête de lingots est nul.

I-4.3.2.3 Etude des masques des lingots

Cette étude est menée de la même façon qu'au paragraphe I-4.3.1.3, et les résultats en sont donnés dans le tableau 6.

De même qu'en I-4.3.1.3, on remarque que :

1° - la présence de déflecteurs semble indispensable à une minimisation efficace des zones de fluide mort le long des parois des lingots.

2° - une répartition géométrique de la charge conforme au plan de chargement B, donne les meilleurs résultats.

Par contre :

1° - pratiquement tous les types de cellules figurant en haut du tableau, ont une longueur de 8,20 mètres.

2° - la hauteur optimale semble être relativement faible 3,60 ou 3,80 mètres.

3° - l'inclinaison du brûleur n'est pas la variable la plus importante.

I-4.3.2.4 Etude globale

Cette étude figure dans les trois premières colonnes du tableau 5 .

1° - les 5 premiers cas de figures mentionnent une longueur de cellule de 8,20 mètres.

2° - une rehausse de la cellule ne semble pas indispensable, mais peut être compensée par l'introduction de déflecteurs et un accroissement de 10 centimètres de la distance axe du brûleur-sole du four (cas n° 461).

3° - le type de chargement utilisé (A, B ou C) n'est pas la variable la plus importante pour la marche optimale du four.

	Cas N°	M	contact flamme voûte plans 1 et 2	contact flamme lingot 1	plans 1 et 2	contact flamme lingot 2	plans 1 et 2	contact flamme lingot 2	plans 1 et 2	masque parei aval du lingot 1	masque parei amont du lingot 2	aval du lingot 2	masque parei amont du lingot 3	aval du lingot 3	masque parei amont du lingot 3	longueur de cellule partie haute	longueur de cellule partie basse	hauteur de cellule	inclinaison du brûleur	déflexeurs	brûleur	chargement
1	434	7.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	1.30	1.10	1.20	1.65	1.10	1.55	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	A
2	461	8.08	2.45	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.43	0.68	0.86	1.00	0.51	0.90	8.20	8.20	3.60	2.00	1	1	D
3	435	8.47	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.56	1.15	1.30	1.65	0.92	1.62	8.20	8.20	4.00	1.50	0	0	A
4	415	8.64	1.77	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.80	1.41	1.21	1.90	0.26	1.25	8.20	8.20	4.00	1.50	0	0	C
5	413	8.65	2.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.50	1.20	1.51	0.21	1.26	8.20	8.20	3.80	1.50	0	0	C
6	422	8.73	1.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	1.11	1.37	1.62	1.15	1.25	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0	A
7	436	8.77	1.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.56	1.15	1.12	1.65	1.52	1.42	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2	A
8	462	8.85	3.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.80	1.00	0.51	0.90	8.20	8.20	3.60	0.00	1	2	B
9	423	9.01	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.53	1.41	1.47	1.57	1.30	1.42	8.00	8.00	3.60	1.50	0	0	A
10	420	9.35	2.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	0.96	0.72	1.62	0.87	1.07	8.00	8.00	3.60	0.00	0	0	A
11	426	9.41	1.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	1.40	1.37	1.65	1.52	1.65	8.00	8.00	4.00	0.00	0	2	A
12	433	9.69	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	1.43	1.61	1.25	1.65	1.47	1.20	8.20	8.20	3.80	1.50	0	0	A
13	463	9.83	3.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.35	0.91	1.00	0.68	0.90	8.20	8.20	3.60	2.00	1	2	B
14	477	10.05	0.32	0.00	0.00	0.37	0.75	0.00	0.00	0.96	0.86	1.00	1.00	0.93	0.90	8.20	8.20	4.00	0.00	1	2	B
15	425	10.06	1.87	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.91	1.15	1.32	1.57	0.42	1.65	8.00	8.00	4.00	1.50	0	0	A
16	430	10.07	2.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.28	1.45	1.30	1.52	1.42	1.60	8.20	8.20	3.60	0.00	0	0	A
17	412	10.19	1.47	0.00	0.00	0.15	0.35	0.00	0.00	1.10	1.43	1.30	1.53	0.55	1.13	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	C
18	460	10.48	3.02	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.95	0.95	1.00	1.00	0.73	0.90	8.20	8.20	3.60	0.00	1	1	B
19	431	10.63	2.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.53	1.26	1.00	1.72	1.57	1.57	8.20	8.20	3.60	1.50	0	0	A
20	414	10.64	2.15	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	1.18	1.43	0.26	1.21	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	C
21	432	10.69	1.47	0.00	0.00	0.07	0.30	0.00	0.00	1.30	1.41	1.15	1.70	1.50	1.65	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	A
22	411	10.69	2.32	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.75	1.55	1.33	1.58	0.13	0.98	8.20	8.20	3.60	1.50	0	0	C
23	475	10.80	1.60	0.00	0.00	0.27	0.60	0.00	0.00	0.56	0.71	0.85	1.00	0.81	0.90	8.20	8.20	3.70	0.00	1	0	B
24	424	10.92	0.90	0.00	0.00	0.22	0.82	0.00	0.00	1.20	1.13	1.52	1.62	1.30	1.65	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	A
25	410	11.01	2.42	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.30	1.18	1.11	1.35	0.33	1.21	8.00	8.20	3.60	0.00	0	0	C

28	472	11.39	1.95	0.00	0.27	0.65	0.36	0.50	0.85	1.00	0.58	0.90	8.20	8.20	3.80	0.00	1	0 C
29	473	11.75	1.07	0.00	0.62	0.72	0.55	0.55	0.70	1.00	0.58	0.90	8.20	8.20	3.80	1.50	1	0 R
30	458	11.96	1.50	0.00	0.22	0.77	1.30	1.23	0.91	1.00	0.60	0.90	8.20	8.20	3.60	0.00	1	0 R
31	402	12.96	2.30	0.00	0.00	0.80	0.46	1.31	0.21	1.50	0.90	1.55	8.00	8.00	3.80	0.00	0	0 C
32	406	13.49	2.22	0.00	0.20	0.80	0.88	1.35	1.03	1.41	0.52	0.80	8.00	8.00	4.00	0.00	0	2 C
33	416	15.47	1.37	0.00	1.37	0.35	0.48	1.35	1.28	1.28	0.53	1.21	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2 C
34	401	16.08	3.40	0.00	0.00	0.80	0.56	1.63	1.10	1.46	1.58	1.58	8.00	8.00	3.60	1.50	0	0 C
35	404	16.10	1.82	0.00	0.65	0.65	1.35	1.60	1.51	1.30	1.50	1.66	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0 C
36	405	16.68	2.45	0.00	0.57	0.50	1.38	1.70	1.43	1.70	1.70	1.70	8.00	8.00	4.00	1.50	0	0 C
37	403	16.69	2.37	0.00	0.50	0.70	1.43	1.61	1.03	1.50	1.66	1.66	8.00	8.00	3.80	1.50	0	0 C
38	400	18.85	3.25	0.00	0.45	0.80	1.25	1.70	1.52	1.58	1.56	1.46	8.00	8.00	3.60	0.00	0	0 C

TABLEAU 5

CLASSIFICATION PAR ORDRE D'INTERET EN CE QUI CONCERNE

LE CONTACT FLAÏME VOUTE				LE CONTACT FLAÏME TÏTES DES LINGOTS				LES MASQUES DES FACES DES LINGOTS			
Cas N°	M ₁	Dimensions de la Cellule		Cas N°	M ₂	Dimensions de la Cellule		Cas N°	M ₃	Dimensions de la Cellule	
532	0.00	8.20	8.20	516	0.30	8.20	8.20	572	5.61	8.20	8.20
575	0.52	8.20	8.20	561	0.32	8.20	8.20	577	5.78	8.20	8.20
526	0.60	8.00	8.00	563	0.47	8.20	8.20	559	5.93	8.20	8.20
504	0.80	8.00	8.00	533	0.50	8.20	8.20	575	6.15	8.20	8.20
577	0.80	8.20	8.20	536	0.62	8.20	8.20	511	6.16	8.20	8.20
505	0.90	8.00	8.00	515	0.72	8.20	8.20	561	6.20	8.20	8.20
535	0.95	8.20	8.20	505	0.77	8.00	8.00	504	6.23	8.00	8.00
534	1.07	8.20	8.20	531	0.77	8.20	8.20	573	6.23	8.20	8.20
558	1.17	8.20	8.20	521	0.85	8.00	8.00	522	6.25	8.00	8.00
500	1.22	8.00	8.00	576	0.85	8.00	8.00	560	6.45	8.20	8.20
524	1.27	8.00	8.00	506	0.87	8.00	8.00	523	6.55	8.00	8.00
525	1.27	8.00	8.00	525	0.90	8.00	8.00	563	6.58	8.20	8.20
502	1.37	8.00	8.00	530	0.95	8.20	8.20	568	6.80	8.20	8.20
503	1.47	8.00	8.00	512	1.15	8.20	8.20	558	6.83	8.20	8.20
516	1.50	8.20	8.20	513	1.15	8.20	8.20	505	6.86	8.00	8.00
523	1.65	8.00	8.00	514	1.15	8.20	8.20	526	6.87	8.00	8.00
512	1.75	8.20	8.20	523	1.15	8.00	8.00	510	6.96	8.20	8.20
506	1.80	8.00	8.00	559	1.15	8.20	8.20	524	6.97	8.00	8.00
513	1.82	8.20	8.20	535	1.17	8.20	8.20	512	7.21	8.20	8.20
536	1.82	8.20	8.20	532	1.20	8.20	8.20	534	7.45	8.20	8.20
573	1.82	8.20	8.20	562	1.30	8.20	8.20	521	7.59	8.00	8.00
515	1.85	8.20	8.20	524	1.32	8.00	8.00	531	7.59	8.20	8.20
560	1.85	8.20	8.20	522	1.35	8.00	8.00	501	7.68	8.00	8.00
530	1.90	8.20	8.20	503	1.37	8.00	8.00	503	7.71	8.00	8.00
572	2.12	8.20	8.20	520	1.37	8.00	8.00	525	7.75	8.00	8.00
510	2.15	8.20	8.20	573	1.37	8.20	8.20	536	7.76	8.20	8.20
522	2.32	8.00	8.00	572	1.47	8.20	8.20	506	8.01	8.00	8.00
559	2.42	8.20	8.20	560	1.55	8.20	8.20	520	8.20	8.00	8.00
514	2.45	8.20	8.20	510	1.60	8.20	8.20	500	8.25	8.00	8.00
561	2.47	8.20	8.20	511	1.60	8.20	8.20	532	8.30	8.20	8.20
531	2.50	8.20	8.20	534	1.60	8.20	8.20	502	8.60	8.00	8.00
533	2.67	8.20	8.20	577	1.62	8.20	8.20	515	8.60	8.20	8.20
501	2.77	8.00	8.00	502	1.65	8.00	8.00	535	8.66	8.20	8.20
521	3.05	8.00	8.00	558	1.72	8.20	8.20	513	8.71	8.20	8.20
520	3.17	8.00	8.00	500	1.77	8.00	8.00	516	8.96	8.20	8.20
562	3.22	8.20	8.20	575	1.82	8.20	8.20	514	8.98	8.20	8.20
511	3.52	8.20	8.20	504	1.95	8.00	8.00	533	9.04	8.20	8.20
563	3.77	8.20	8.20	501	2.05	8.00	8.00	530	9.06	8.20	8.20

TABLEAU 8

4° - l'optimum du fonctionnement doit être obtenu dans les mêmes conditions que pour la charge 1, toutefois, la distance axe du brûleur-sole, doit être maintenue à la valeur utilisée actuellement.

Le cas le plus favorable pour une charge de type 1, figure à la ligne 7 du tableau 5.

I-4.3.3. Charge 3

Pour les mêmes raisons que celles évoquées en I-4.3.2, nous n'avons pas pu expérimenter cette charge en présence des déflecteurs pour une longueur de four égale à 8 mètres.

I-4.3.3.1 Etude du contact flamme-voûte (tabl. 8)

Le paramètre étudié est $M_1 = (A_1^1 + A_1^2)/2$.

Les lingots H.B. étant placés près du brûleur, il semble que l'on doive rencontrer des conclusions voisines de celles relatives à la charge 1.

En effet, un accroissement de la hauteur de la maquette, paraît nécessaire pour diminuer l'importance de la longueur du contact flamme-voûte.

Cependant, l'influence des lingots E placés en bout de cellule est importante. Contrairement au paragraphe I-4.3.1, il ne semble pas que la longueur du four joue un rôle très important. De plus, il est très difficile de mettre en évidence un plan de chargement optimal.

Enfin, la géométrie actuelle de la cellule ainsi que le plan de chargement C, donnent une relative satisfaction.

I-4.3.3.2 Etude du contact flamme-lingots

Comme en I-4.3.1.2, un accroissement de la distance axe du brûleur-sole, est souhaitable pour diminuer l'importance du paramètre M_2 .

D'autre part, les six cas les plus intéressants, sont obtenus pour une cellule allongée de 20 centimètres.

Il semble également qu'une inclinaison de l'injecteur de 1,5 à 2 degrés améliore le fonctionnement du Pit.

	Cas N°	M	contact flamme vent	plans 1 et 2	contact flamme long 1	plans 1 et 2	contact flamme long 2	plans 1 et 2	contact flamme long 2	plans 1 et 2	masque pour aval du long 1	masque pour aval du long 2	masque pour aval du long 2	masque pour aval du long 3	masque pour aval du long 3	longueur de la cellule partie haute	longueur de la cellule partie basse	hauteur de la cellule	inclinaison du brûleur	défectueux	brûleur	chargement
1	526	10.03	0.60	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.91	0.23	1.42	1.42	1.65	0.95	1.70	2.00	4.00	0.00	0	2	A
2	505	10.25	0.90	0.00	0.00	0.57	0.20	0.20	0.20	0.78	1.28	1.41	1.41	1.68	0.00	1.70	2.00	4.00	1.50	0	0	C
3	516	10.47	1.50	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	1.78	2.06	1.23	1.23	1.61	0.31	1.35	2.20	4.00	0.00	0	2	C
4	561	10.70	2.47	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.70	2.00	0.66	0.66	1.60	0.83	1.00	2.20	3.60	2.00	1	1	B
5	532	11.53	0.00	0.05	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.63	0.91	1.42	1.42	1.45	1.22	1.65	2.20	3.80	0.00	0	0	A
6	536	11.95	1.82	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06	1.40	1.27	1.27	1.70	0.70	1.62	2.20	4.00	0.00	0	2	A
7	525	12.21	1.27	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.91	1.40	1.40	1.62	1.35	1.67	2.00	4.00	1.50	0	0	A
8	515	13.05	1.85	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	1.96	1.35	1.35	1.50	1.25	1.27	2.20	4.00	1.50	0	0	C
9	506	13.31	1.80	0.00	0.67	0.20	0.20	0.20	0.20	1.05	2.01	1.43	1.43	1.60	0.23	1.68	2.00	4.00	0.00	0	2	C
10	523	13.41	1.65	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	1.06	1.05	1.05	1.57	0.50	1.47	2.00	3.80	1.50	0	0	A
11	535	13.55	0.95	0.15	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	1.55	1.69	1.69	1.35	1.42	1.62	2.20	4.00	1.50	0	0	A
12	577	13.58	0.80	0.47	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.36	1.45	0.35	0.35	1.00	0.61	1.00	2.20	4.00	0.00	1	0	B
13	524	13.82	1.27	0.17	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.28	1.52	1.52	1.57	1.17	1.65	2.00	4.00	0.00	0	0	A
14	533	13.87	2.67	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.41	1.65	1.45	1.45	1.50	1.32	1.70	2.20	3.80	1.50	0	0	A
15	531	13.93	2.50	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	1.38	1.13	1.45	1.45	1.60	0.60	1.42	2.20	3.60	1.50	0	0	A
16	512	14.06	1.75	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	2.03	1.28	1.28	1.28	0.48	1.20	2.20	3.80	0.00	0	0	C
17	575	14.27	0.52	0.55	1.15	0.12	0.12	0.12	0.12	1.55	1.36	0.58	0.58	1.00	0.65	1.00	2.20	3.90	0.00	1	0	B
18	563	14.31	3.77	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	1.38	2.00	0.68	0.68	1.00	0.51	1.00	2.20	3.60	2.00	1	2	B
19	559	14.55	2.42	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	1.61	0.51	0.51	1.00	0.65	1.00	2.20	3.60	1.50	1	0	B
20	530	14.59	1.90	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	1.71	1.55	1.55	1.62	0.77	1.50	2.20	3.60	0.00	0	0	A
21	573	14.68	1.82	0.22	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76	1.40	0.52	0.52	1.00	0.68	1.00	2.20	3.60	0.00	0	0	A
22	503	14.96	1.47	0.00	0.65	0.72	0.00	0.00	0.00	1.05	1.61	1.31	1.31	1.62	0.55	1.70	2.00	3.80	1.50	1	0	B
23	534	15.12	1.07	0.45	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.91	1.47	1.47	1.60	1.00	1.50	2.20	4.00	0.00	0	0	C
24	513	15.21	1.82	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.41	1.96	1.35	1.35	1.60	1.93	1.55	2.20	3.80	1.50	0	0	C
25	572	15.36	2.12	0.22	1.15	0.10	0.10	0.10	0.10	1.50	1.51	0.48	0.48	1.00	0.11	1.60	2.20	3.20	0.00	1	0	B

29	522	15.57	2.32	0.20	1.15	0.00	0.78	0.60	1.07	1.47	1.00	1.57	8.00	8.00	0.00	0	0	0	0
30	560	15.75	1.85	0.00	1.15	0.40	1.41	1.60	0.68	1.00	0.88	1.00	0.20	8.20	0.00	1	1	0	0
31	514	16.63	2.45	0.00	1.15	0.00	1.60	2.01	1.50	1.68	0.85	1.55	8.20	8.20	0.00	0	0	0	0
32	502	16.73	1.57	0.00	1.05	0.60	1.51	1.81	1.75	1.68	0.45	1.38	8.00	8.00	0.00	0	0	0	0
33	500	16.82	1.22	0.00	1.15	0.62	1.33	1.10	1.45	1.70	1.05	1.50	8.00	8.00	0.00	0	0	0	0
34	510	16.94	2.15	0.35	1.15	0.10	1.25	2.13	1.03	1.65	0.91	0.88	8.20	8.20	0.00	0	0	0	0
35	562	17.48	3.22	0.15	1.15	0.00	1.66	1.91	0.33	1.00	0.88	1.00	8.20	8.20	0.00	1	1	0	0
36	520	18.69	3.17	0.22	1.15	0.00	1.70	1.18	1.30	1.52	1.05	1.45	8.00	8.00	0.00	0	0	0	0
37	511	19.16	3.52	0.45	1.15	0.00	0.63	1.98	0.90	1.30	0.36	0.98	8.20	8.20	1.50	0	0	0	0
38	501	20.92	2.77	0.12	1.15	0.77	0.00	2.05	1.28	1.53	1.10	1.61	8.20	8.20	1.50	0	0	0	0

TASLEAU 7

I-4.3.3.3 Etude des masques des lingots

Cette étude figure dans le tableau 8. Comme pour les deux premiers types de charges, nous constatons que :

1° - l'influence des déflecteurs est primordiale.

2° - la répartition géométrique des lingots suivant le cas B du schéma 12 est la meilleure.

De même que pour la charge 2, toutes les cellules situées en haut du tableau ont une longueur de 8,20 mètres. L'inclinaison du brûleur n'est pas déterminante.

I-4.3.3.4 Etude globale

Toujours basée sur l'utilisation de la formule (16), cette étude figure dans le tableau 7.

Il semble qu'une rehausse de la cellule en améliore le fonctionnement, de même qu'une augmentation de la distance axe du brûleur-sole.

Par contre, un allongement de la cellule ne paraît pas indispensable, pas plus d'ailleurs que l'inclinaison de l'injecteur.

I-4.3.4 Charge 4

La position des lingots H.B en bout de cellule, a permis d'étudier la cellule de 8 mètres comportant des déflecteurs.

I-4.3.4.1 Etude du contact flamme-voûte

Le tableau 10 résume cette étude.

Il est aisé de constater que :

1° - une cellule dont la hauteur est supérieure ou égale à 3,80 mètres optimise ce paramètre. Cependant, une faible hauteur et l'introduction de déflecteurs peut donner sensiblement les mêmes résultats.

2° - les plans de chargement les plus adaptés à une évolution favorable du paramètre longueur du contact flamme-voûte, semblent être des types A ou B. Le plan de chargement actuel serait donc à écarter.

LE CONTACT FLAMME VOUTE				LF CONTACT FLAMME TETES DES LINGOTS				LES MASQUES DES FACES DES LINGOTS			
Cas N°	M ₁	Dimensions de la Cellule		Cas N°	M ₂	Dimensions de la cellule		Cas N°	M ₃	Dimensions de la Cellule	
675	0.92	8.20	8.20 3.90 0.00	1	0 R	8.20	8.20 3.60 1.50	0	0 A	8.20	8.20 3.90 0.00
626	1.17	8.00	8.00 4.00 0.00	0	2 A	8.20	8.20 3.60 1.50	0	0 C	8.00	8.00 3.80 0.00
676	1.27	8.00	8.00 4.00 0.00	1	0 A	8.00	8.00 3.60 0.00	0	0 A	8.20	8.20 3.60 1.50
622	1.35	8.00	8.00 3.80 0.00	0	0 A	8.00	8.00 3.80 0.00	0	0 A	8.00	8.00 3.60 0.00
635	1.42	8.20	8.20 4.00 1.50	0	0 A	8.00	8.00 4.00 0.00	0	0 A	8.20	8.20 3.80 0.00
670	1.47	8.00	8.00 3.60 0.00	1	0 R	8.00	8.00 4.00 1.50	0	0 A	8.20	8.20 3.60 0.00
604	1.57	8.00	8.00 4.00 0.00	0	0 C	8.00	8.00 4.00 0.00	0	2 A	8.20	8.20 3.60 2.00
660	1.65	8.20	8.20 3.60 0.00	1	1 R	8.20	8.20 3.60 0.00	0	0 A	8.00	8.00 3.60 1.50
632	1.67	8.20	8.20 3.80 0.00	0	0 A	8.20	8.20 3.60 1.50	0	0 A	8.20	8.20 3.80 1.50
677	1.67	8.20	8.20 4.00 0.00	1	2 R	8.20	8.20 3.80 0.00	0	0 A	8.20	8.20 4.00 0.00
636	1.80	8.20	8.20 4.00 0.00	0	2 A	8.20	8.20 3.80 1.50	0	0 A	8.20	8.20 3.60 0.00
658	1.80	8.20	8.20 3.60 0.00	1	0 R	8.20	8.20 4.00 0.00	0	0 A	8.20	8.20 3.60 2.00
602	1.92	8.00	8.00 3.30 0.00	0	0 C	8.20	8.20 4.00 1.50	0	0 A	8.00	8.00 3.50 1.50
631	2.00	8.00	8.00 3.60 1.50	0	0 A	8.20	8.20 4.00 0.00	0	2 A	8.20	8.20 3.60 0.00
603	2.02	8.00	8.00 3.80 1.50	0	0 C	8.20	8.20 3.60 0.00	1	0 R	8.00	8.00 4.00 0.00
634	2.07	8.20	8.20 4.00 0.00	0	0 A	8.20	8.20 3.60 0.00	1	1 R	8.00	8.00 4.00 0.00
605	2.12	8.00	8.00 4.00 1.50	0	0 C	8.20	8.20 3.60 2.00	1	1 R	8.00	8.00 3.60 0.00
624	2.15	8.00	8.00 4.00 0.00	0	0 A	8.00	8.00 3.60 1.50	1	0 R	8.00	8.00 3.80 1.50
673	2.15	8.20	8.20 3.80 1.50	1	0 R	8.20	8.20 4.00 0.00	1	2 R	8.00	8.00 4.00 1.50
630	2.20	8.20	8.20 3.60 0.00	0	0 A	8.00	8.00 4.00 0.00	1	2 R	8.00	8.00 3.80 0.00
620	2.22	8.00	8.00 3.60 0.00	0	0 A	8.20	8.20 3.60 2.00	1	2 R	8.00	8.00 4.00 0.00
625	2.30	8.00	8.00 4.00 1.50	0	0 A	8.20	8.20 3.60 1.50	0	0 C	8.00	8.00 4.00 0.00
633	2.30	8.20	8.20 3.80 1.50	0	0 A	8.20	8.20 4.00 1.50	0	0 C	8.20	8.20 3.60 0.00
672	2.32	8.20	8.20 3.80 0.00	1	0 R	8.20	8.20 3.60 1.50	1	0 R	8.20	8.20 3.80 1.50
614	2.35	8.20	8.20 4.00 0.00	0	0 C	8.20	8.20 3.80 1.50	1	0 R	8.00	8.00 4.00 0.00
615	2.37	8.20	8.20 4.00 0.00	0	0 C	8.00	8.00 4.00 0.00	1	0 R	8.20	8.20 4.00 0.00
674	2.47	8.00	8.00 3.80 0.00	1	0 R	8.20	8.20 3.90 0.00	1	0 R	8.20	8.20 4.00 0.00
606	2.62	8.00	8.00 4.00 0.00	0	2 C	8.20	8.20 3.60 0.00	0	0 C	8.00	8.00 3.80 0.00
623	2.65	8.00	8.00 3.80 1.50	0	0 A	8.20	8.20 4.00 0.00	0	2 C	8.00	8.00 3.80 1.50
612	2.70	8.20	8.20 3.80 0.00	0	0 C	8.00	8.00 3.80 1.50	0	0 A	8.20	8.20 4.00 1.50
678	2.70	8.00	8.00 4.00 0.00	1	2 R	8.20	8.20 3.60 0.00	1	2 R	8.20	8.20 3.80 0.00
621	2.72	8.00	8.00 3.60 1.50	0	0 A	8.00	8.00 3.60 0.00	1	0 R	8.00	8.00 4.00 0.00
616	2.90	8.20	8.20 4.00 0.00	0	2 C	8.00	8.00 3.80 0.00	1	0 R	8.20	8.20 3.80 0.00
671	2.90	8.00	8.00 3.60 1.50	1	0 R	8.00	8.00 3.80 0.00	0	0 C	8.20	8.20 4.00 0.00
613	2.95	8.20	8.20 3.30 1.50	0	0 C	8.00	8.00 3.60 0.00	0	0 C	8.20	8.20 3.60 0.00
600	2.97	8.00	8.00 3.60 0.00	0	0 C	8.00	8.00 3.60 1.50	0	0 C	8.20	8.20 4.00 0.00
661	3.05	8.20	8.20 3.60 2.00	1	1 R	8.00	8.00 3.80 1.50	0	0 C	8.20	8.20 3.60 1.50
611	3.07	8.20	8.20 3.60 1.50	0	0 C	8.00	8.00 4.00 1.50	0	0 C	8.20	8.20 3.80 1.50
610	3.25	8.20	8.20 3.60 0.00	0	0 C	8.20	8.20 3.80 0.00	0	0 C	8.20	8.20 4.00 0.00
659	3.32	8.20	8.20 3.60 1.50	1	0 R	8.20	8.20 4.00 0.00	1	0 R	8.00	8.00 4.00 1.50
601	3.35	8.00	8.00 3.60 0.00	0	0 C	8.00	8.00 4.00 0.00	1	0 R	8.20	8.20 3.60 1.50
662	3.37	8.20	8.20 3.60 0.00	1	2 R	8.20	8.20 3.90 0.00	1	0 R	8.00	8.00 3.60 1.50
663	3.42	8.20	8.20 3.60 2.00	1	2 R	8.00	8.00 4.00 0.00	0	0 C	8.20	8.20 4.00 0.00

3° - Une inclinaison de 1,5 degré entraîne une diminution des valeurs de A_1^i .

4° - la cellule actuellement utilisée ne semble pas donner satisfaction.

I-4.3.4.2 Etude du contact flamme-lingots

D'après le tableau 10, il est clair, comme pour les charges 1 et 2, que la répartition géométrique A s'impose.

Notons d'autre part que tous les types de cellules entre les numéros 620 et 678 inclus donnent, aux erreurs expérimentales près, les mêmes valeurs du paramètre :

$$M_2 = \sum_{i=1}^3 (B_1^i + B_2^i) \quad .$$

Dix huit cas de figures différents permettent les mêmes résultats

Enfin, le plan de chargement C entraîne un accroissement notable de M_2 .

I-4.3.4.3 Etude des masques des lingots

Comme pour les charges 1, 2 et 3, l'introduction de déflecteurs joue un rôle primordial. En effet, le tableau 10 montre que les différents types de fours utilisant des déflecteurs, dont la répartition de charge est conforme au modèle B de la figure 12, permettent de minimiser de manière efficace les masques entre lingots.

D'autre part, la cellule actuellement utilisée permet un fonctionnement correct vis à vis de ce paramètre. En effet, dans le tableau 10, le cas 600 se trouve immédiatement après les fours utilisant un chargement du type B.

I-4.3.4.4. Etude globale (tableau 9)

1° - Le plan de chargement semble avoir une importance assez grande. En effet, les cellules utilisant un chargement de type B avec déflecteurs sont situées en haut du tableau 9 et les charges de type C sont toutes en bas du même tableau.

29	662	12.48	3.37	0.00	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	1.33	0.93	0.43	0.65	8.20	8.20	3.60	0.00	1	2	B
30	613	12.52	2.95	0.00	0.00	0.15	1.13	1.33	1.15	1.15	2.03	1.56	1.60	8.20	8.20	3.80	1.50	0	0	C
31	603	12.88	2.02	0.00	0.55	0.50	0.20	1.23	0.00	1.73	0.30	1.91	3.00	8.00	8.00	3.80	1.50	0	0	C
32	615	13.22	2.37	0.00	0.27	0.30	0.71	1.33	1.43	1.43	2.08	1.25	1.58	8.20	8.20	4.00	1.50	0	0	C
33	605	13.29	2.12	0.00	0.57	0.50	0.35	1.08	1.20	1.46	0.90	0.50	8.00	8.00	8.00	4.00	1.50	0	0	C
34	606	13.62	2.62	0.00	0.10	0.50	0.73	1.45	1.35	1.61	1.30	1.61	8.00	8.00	8.00	4.00	0.00	0	2	C
35	623	13.84	2.65	0.00	0.35	0.30	1.46	1.60	1.00	1.23	1.37	1.27	8.00	8.00	8.00	3.80	1.50	0	0	A
36	600	14.15	2.97	0.10	0.62	0.30	0.28	1.31	0.85	1.55	0.11	0.50	8.00	8.00	8.00	3.60	0.00	0	0	C
37	611	14.64	3.07	0.00	0.22	0.30	1.21	1.53	1.21	1.03	1.13	1.76	8.20	8.20	8.20	3.60	1.50	0	0	C
38	601	14.75	3.35	0.00	0.80	0.25	0.00	1.05	1.06	1.55	0.31	0.21	8.00	8.00	8.00	3.60	1.50	0	0	C
39	616	14.81	2.90	0.00	0.35	0.30	0.05	1.73	1.26	1.83	1.10	1.76	8.20	8.20	8.20	4.00	0.00	0	2	C
40	610	15.44	3.25	0.00	0.35	0.30	1.53	1.36	1.23	1.00	1.05	1.46	8.20	8.20	8.20	3.60	0.00	0	0	C
41	614	15.45	2.35	0.00	0.80	0.30	1.18	1.26	1.03	1.06	1.13	1.60	8.20	8.20	8.20	4.00	0.00	0	0	C
42	604	16.25	1.57	0.17	1.35	0.25	0.38	1.41	1.10	1.18	0.76	1.50	8.00	8.00	8.00	4.00	0.00	0	0	C
43	612	16.32	2.70	0.00	0.80	0.30	0.70	1.43	1.23	2.00	1.33	1.43	8.20	8.20	8.20	3.80	0.00	0	0	C

TABLEAU 9

Cependant, il est très difficile, sinon impossible de dire si cette répartition des différents cas de figures est due au plan de chargement ou, à la présence des déflecteurs.

2° - un accroissement de 20 centimètres de la distance axe du brûleur-sole, paraît améliorer le fonctionnement du Pit (à condition toutefois que la hauteur de cellule soit de 4 mètres).

3° - les trois types de fours les plus intéressants, ont tous une longueur de 8,20 mètres.

I-4.3.5 Recherche de la cellule optimale en tenant compte des différentes charges

D'après les résultats donnés dans les tableaux 3, 5, 7 et 9, il semble que deux cas de figures permettent un fonctionnement optimal du four. Il s'agit de cellules telles que :

- la hauteur soit de 4 mètres,
- le brûleur soit horizontal,
- la distance axe de l'injecteur-sole du four soit augmentée de 20 centimètres,
- le plan de chargement soit du type A (fig. 12),
- la longueur de la cellule soit de 8,20 ou 8 mètres.

I-4.3.6 Mesures des températures des fumées par les cannes pyrométriques

La position des cannes pyrométriques ne sera étudiée que dans les deux cas de figures mentionnés au paragraphe précédent.

Pour la cellule courte (8 mètres de long), l'emplacement actuel semble convenir, sauf pour la charge n° 2 constituée de 8 lingots E. Dans ce cas, les pyromètres se trouvent dans une zone de basse vitesse des fumées. Il serait bon de mesurer la température des fumées par l'intermédiaire de pyromètres placés le long des parois longitudinales de la cellule.

Par contre, pour la cellule longue, il ne semble pas nécessaire de changer la position des cannes pyrométriques. En effet, le jet issu du brûleur arrive directement à assez grande vitesse sur la paroi arrière, dans la zone des cannes pyrométriques.

I-5 CONCLUSION DU CHAPITRE I

Au cours de cette étude, on peut constater que la visualisation d'un phénomène permet d'en étudier les grandes lignes.

Il est possible de remarquer (I-4.3.1.1, I-4.3.2.1, I-4.3.3.1, I-4.3.4.1), que pour les quatre types de charges, une réduction du contact flamme-voûte, pourrait être obtenue par :

- 1° - Un accroissement de la hauteur de la maquette.
- 2° - Un allongement de la cellule pour les charges 1 et 2.
- 3° - L'utilisation d'un plan de chargement du type B.

D'autre part, pour trois des quatre charges essayées, nous avons constaté que (I-4.3.1.2, I-4.3.2.2., I-4.3.3.2 et I-4.3.4.2) :

- 1° - Un allongement du four,
- 2° - un plan de chargement du type A,
- 3° - un accroissement de la distance axe du brûleur-sole, permettent de minimiser l'importance des zones de contact entre la flamme et les lingots.

De plus, les masques entre lingots, peuvent être sensiblement diminués dans tous les cas, grâce à l'introduction de déflecteurs entre les lingots 2-3, 3-4, 2'-3' et 3'-4', et à une répartition géométrique de la charge conforme au schéma B de la figure 12 (I-4.3.1.3 I-4.3.2.3, I-4.3.3.3, I-4.3.4.3).

Enfin, deux types de cellules doivent permettre un fonctionnement optimal (I-4.3.5. et tableaux 3, 5, 7 et 9).

Néanmoins, cette étude pourrait être complétée par :

1° - une détermination exacte de l'enveloppe stoechiométrique de la flamme. Ceci peut être obtenu grâce à l'injection simultanée de gaz simulant le combustible et le comburant, puis par une étude du champ des concentrations,

2° - une étude des temps de séjour à l'intérieur du four. Cependant, l'écoulement étant tridimensionnel, cette étude est assez difficilement réalisable.

Enfin, il serait bon de vérifier sur le four Pit, la validité des différentes conclusions énoncées ci-dessus.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DU RAYONNEMENT THERMIQUE

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à :

- une étude des variations des facteurs géométriques, en fonction de l'inclinaison des lingots par rapport à l'axe longitudinal de la cellule,

- d'autre part, à la détermination numérique des énergies échangées par rayonnement, entre les différentes parois des lingots et du four. Pour cette deuxième partie, nous avons fait très largement appel aux nombreux travaux de H.C HOTTEL sur le rayonnement.

Il est évident qu'un bilan des énergies rayonnées ne peut être réalisé sans la connaissance préalable des facteurs géométriques, relatifs à la disposition utilisée.

II FACTEURS GEOMETRIQUES

II-1 Généralités

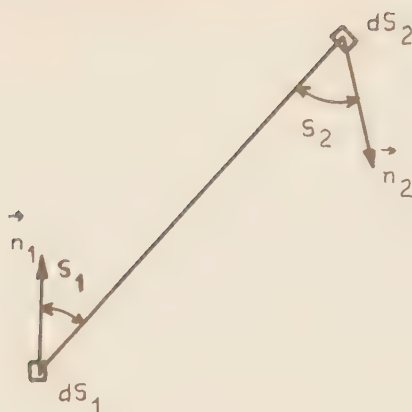
Dans le cas où plusieurs surfaces, dont les facteurs d'émission et d'absorption sont différents, cohabitent dans une même enceinte ; il est habituel d'introduire la notion de facteur géométrique. Notons que ce terme a deux synonymes : facteur de vue et facteur d'angle.

Nous emprunterons à HOTTEL [24], la définition suivante :

Le facteur géométrique de la surface S_2 depuis la surface S_1 est la fraction du rayonnement émis dans toutes les directions par la surface noire S_1 , et qui est reçue par la surface S_2 .

En considérant des éléments de surface de petites dimensions dS_1 et dS_2 , au lieu des surfaces S_1 et S_2 (fig. 13), l'expression du facteur géométrique s'écrit :

$$F_{d1-d2} = \frac{\cos \delta_1 \cos \delta_2 dS_2}{\pi r^2} \quad (17)$$



- FIGURE 13 -

- r est la distance $dS_1 - dS_2$
- δ_1 et δ_2 sont les angles formés par les normales aux éléments de surface dS_1 et dS_2 , et le segment de droite $dS_1 - dS_2$.

Dans le cas de deux surfaces S_1 et S_2 , le facteur géométrique devient:

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \delta_1 \cos \delta_2}{r^2} dS_1 dS_2, \quad (18)$$

de même

$$F_{2-1} = \frac{1}{\pi S_2} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \delta_1 \cos \delta_2}{r^2} dS_1 dS_2,$$

donc

$$S_1 F_{1-2} = S_2 F_{2-1}. \quad (19)$$

De plus, si la surface S_i forme avec $n - 1$ surfaces S_j non disjointes une enceinte

$$\sum_{j=1}^n F_{i-j} = 1. \quad (20)$$

II-2 Cas des surfaces planes

SPARROW [29] montre qu'il est possible d'obtenir une formulation simplifiée du facteur géométrique.

Introduisons une longueur caractéristique L ainsi que :

- $\bar{x}$, $\bar{y}$ et $\bar{z}$ coordonnées réduites telles que $\bar{x} = \frac{x}{L}$, $\bar{y} = \frac{y}{L}$,
 $\bar{z} = \frac{z}{L}$,
- $\bar{r}$ distance réduite égale à $\frac{r}{L}$,
- $\bar{S}$ aire réduite ($\bar{S} = \frac{S}{L^2}$) de la surface S .

Alors :

- $\bar{x}_1$, $\bar{y}_1$, $\bar{z}_1$ et $\bar{x}_2$, $\bar{y}_2$, $\bar{z}_2$ sont les coordonnées réduites, respectivement d'un point de $\bar{S}_1$, et d'un point de $\bar{S}_2$,
- l , m et n avec les indices 1 ou 2 sont les cosinus directeurs, relatifs soit à $\bar{S}_1$ soit à $\bar{S}_2$.

L'auteur scinde ensuite le problème en deux parties.

II-2.1 Facteur géométrique entre un élément infinitésimal et une surface finie

En coordonnées cartésiennes, le facteur géométrique

$$F_{d1-2} = \iint_{(\bar{S}_2)} \frac{\cos \delta_1 \cos \delta_2}{\pi \bar{r}^2} d\bar{S}_2$$

peut s'écrire :

$$F_{d1-2} = \iint_{(\bar{S}_2)} \left\{ l_2(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)\bar{f} + m_2(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)\bar{f} + n_2(\bar{z}_2 - \bar{z}_1)\bar{f} \right\} d\bar{S}_2 ,$$

avec :

$$\bar{f} = [l_1(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) + m_1(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) + n_1(\bar{z}_2 - \bar{z}_1)] / \pi \bar{r}^4 , \quad (21)$$

et :

$$\bar{r}^2 = (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + (\bar{y}_2 - \bar{y}_1)^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2 .$$

Puis en appliquant le théorème de STOKES relatif à la transformation d'intégrale de surface en intégrale curviligne :

$$\oint_C (Pdx + Qdy + Rdz) = \iint_{S_1} \left[l \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) + m \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right) + n \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right] dS, \quad (22)$$

le facteur géométrique s'écrit :

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \oint_{C_2} \left\{ \frac{-m(\bar{z}_2 - \bar{z}_1) + n_1(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{\bar{r}^2} d\bar{x}_2 + \frac{l_1(\bar{z}_2 - \bar{z}_1) - n_1(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)}{\bar{r}^2} d\bar{y}_2 + \frac{-l_1(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) + m_1(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)}{\bar{r}^2} d\bar{z}_2 \right\}. \quad (23)$$

Le contour C_2 représente la limite de la surface $\bar{S}_2$ et $\bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{z}_2$ sont les coordonnées d'un point courant de C_2 ; l_1, m_1 et n_1 sont les cosinus directeurs de l'élément de surface $d\bar{S}_1$.

II-2.2 Facteur géométrique entre deux surfaces finies

Compte tenu de la possibilité d'intervenir les signes somme, les équations (18) et (23) permettent d'écrire :

$$\begin{aligned} 2\pi \bar{l}_1 F_{1-2} = & \oint_{C_2} d\bar{x}_2 \iint_{(\bar{S}_1)} \frac{-m_1(\bar{z}_2 - \bar{z}_1) + n_1(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{\bar{r}^2} d\bar{S}_1 \\ & + \oint_{C_2} d\bar{y}_2 \iint_{(\bar{S}_1)} \frac{l_1(\bar{z}_2 - \bar{z}_1) - n_1(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)}{\bar{r}^2} d\bar{S}_1 \\ & + \oint_{C_2} d\bar{z}_2 \iint_{(\bar{S}_1)} \frac{-l_1(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) + m_1(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)}{\bar{r}^2} d\bar{S}_1. \end{aligned} \quad (24)$$

En appliquant le théorème de STOKES à chacune des trois parties de l'équation (24), on constate que :

$$\begin{aligned} P &= \text{Log } \bar{r} , & Q &= 0 , & R &= 0 \\ P &= 0 , & Q &= \text{Log } \bar{r} , & R &= 0 \\ P &= 0 , & Q &= 0 , & R &= \text{Log } \bar{r} \end{aligned}$$

satisfont (22), respectivement pour chaque terme de (24).

Ainsi, le facteur de vue de la surface S_2 depuis la surface S_1 devient :

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi S_1} \oint_{c_1} \oint_{c_2} [\text{Log } \bar{r} d\bar{x}_1 d\bar{x}_2 + \text{Log } \bar{r} d\bar{y}_1 d\bar{y}_2 + \text{Log } \bar{r} d\bar{z}_1 d\bar{z}_2] . \quad (25)$$

On peut constater que la méthode décrite ci-dessus, entraîne des simplifications notables dans le calcul des facteurs géométriques.

II-3 Détermination numérique de facteurs géométriques dans quelques cas particuliers

Nous avons déterminé analytiquement, ou numériquement le facteur géométrique entre :

- deux rectangles dont les plans sont parallèles ou perpendiculaires,
- les deux cas de figure précédente auxquelles on ajoute un demi-plan obstacle à arête verticale,
- deux rectangles dont les plans forment dièdre d'angle α , avec ou sans demi-plan obstacle à arête verticale ou horizontale,
- enfin, le facteur géométrique d'une surface quadrilatérale ou triangulaire depuis un rectangle dont le plan est perpendiculaire et entre lesquels est interposé un demi-plan obstacle à arête verticale.

Les calculs étant assez longs, nous donnons en annexe II, les méthodes employées ainsi que divers résultats analytiques.

Dans tout ce qui suit, les notations A-II n font référence au chapitre n de l'annexe II.

II-4 Etude des facteurs géométriques dans la cellule Pit, en fonction de l'inclinaison des lingots par rapport à l'axe longitudinal de la cellule

II-4.1 Remarques générales

On admet que :

- 1°) la disposition géométrique des lingots,
- 2°) la répartition des températures,
- 3°) la distribution des types de réfractaires,

sont symétriques par rapport au plan de symétrie longitudinal de la cellule. On introduira ainsi une paroi fictive PQ correspondant à ce plan de symétrie. L'étude ne sera réalisée que pour 4 lingots HB disposés sur la demi-largeur de la cellule. De plus, on supposera que la surface des entrées de combustible et, de comburant, dans la paroi avant, se trouvent dans les mêmes conditions de rayonnement que le reste de la paroi. La même hypothèse sera faite en ce qui concerne la surface des carneaux. De plus, comme au chapitre I, la cellule est supposée parallélépipédique ainsi que les lingots.

De manière générale, la disposition des lingots dans la demi-cellule sera la suivante : (fig. 14)

- l'axe vertical des lingots est situé dans le plan de symétrie longitudinal de la demi-cellule,

- la position des traces des axes verticaux des lingots sur la sole est symétrique par rapport au plan de symétrie transversal V W du four (fig. 14),

- l'angle θ d'inclinaison des lingots est l'angle formé par une paroi longitudinale d'un lingot et la paroi longitudinale de la cellule. Cet angle est compté suivant le sens trigonométrique (fig. 14A),

- de manière à simplifier l'écriture, nous avons numéroté chaque paroi :

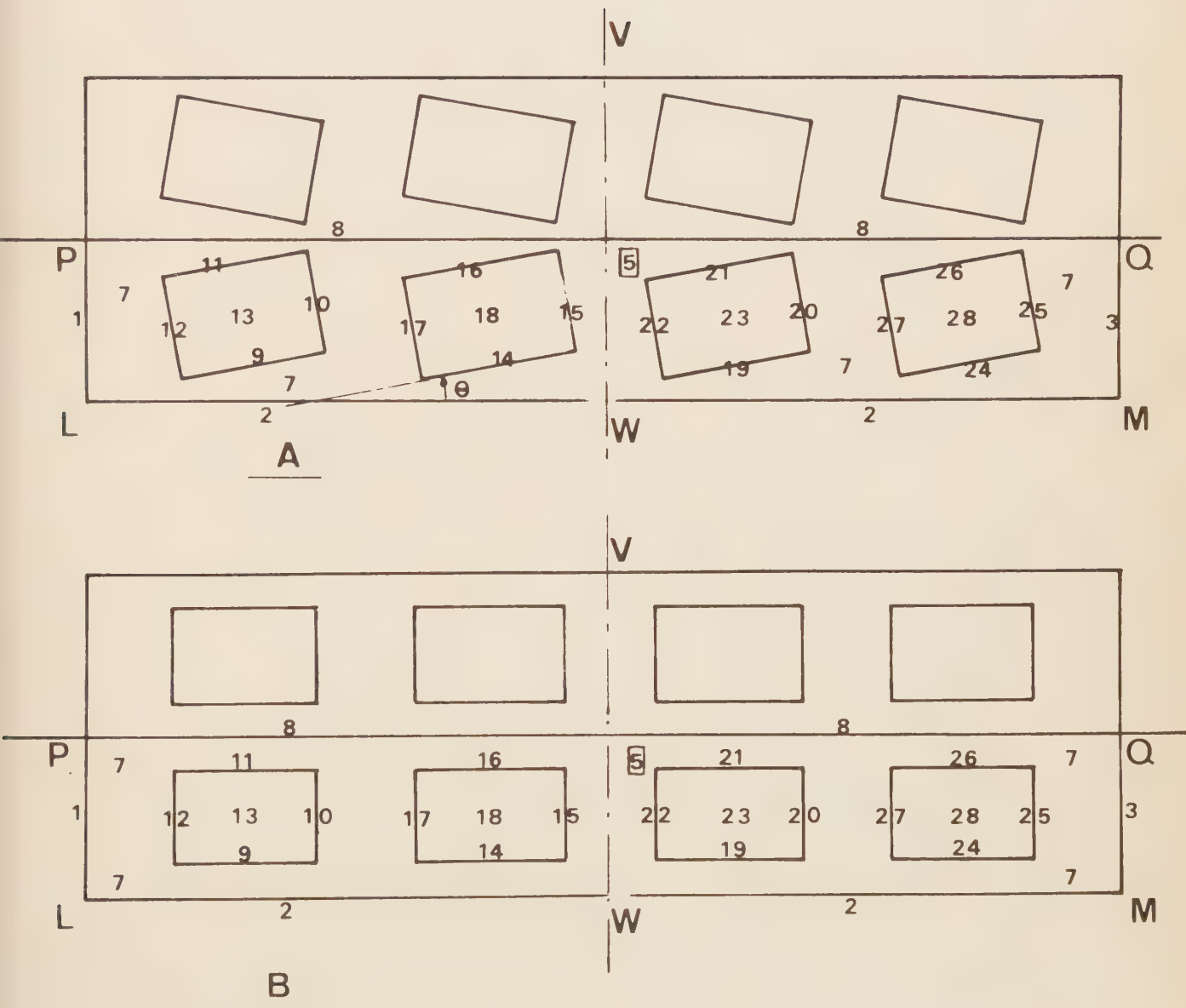


FIGURE 14

- 1 et 3 parois avant et arrière,
- 2 paroi longitudinale,
- 5 voûte complète (groupant les éléments 4, 5, et 6 du paragraphe III),
- 7 sole complète,
- 8 paroi fictive PQ,
- 9, 10, 11, 12, 13 Faces du lingot 1,
- 14, 15, 16, 17, 18 Faces du lingot 2,
- 19, 20, 21, 22, 23 Faces du lingot 3,
- 24, 25, 26, 27, 28 Faces du lingot 4.

D'autre part, on suppose que, dans le cas où les faces des lingots sont parallèles à celles du four (fig. 14B), la distance entre les parois 10 et 17 est égale à 0,50 mètre, alors la face 12 est située à 0,93 mètre de la paroi avant du four.

Enfin, les calculs seront effectués pour une cellule normale : 8 mètres de long, 2,50 mètres de large et 3,60 mètres de profondeur.

Compte tenu de ces remarques, nous étudions les facteurs géométriques relatifs à chaque face des lingots, lorsque θ varie de 0 à 27 degrés. En effet, si $\theta = 27$ degrés, les arêtes des lingots sont en contact avec les parois du four.

Compte tenu de la symétrie adoptée, il suffit de déterminer les facteurs géométriques relatifs aux lingots 1 et 2.

De plus, il est clair que pour toutes les valeurs de θ comprises entre 0 et 27 degrés :

1°) Compte tenu des grandes dimensions des parois de la cellule par rapport aux faces des lingots

$$\begin{aligned} F_{14-2} & \# F_{9-2} \\ F_{14-7} & \# F_{9-7} \\ F_{14-5} & \# F_{9-5} \\ F_{15-2} & \# F_{10-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{15-5} & \neq F_{10-5} \\
 F_{15-7} & \neq F_{10-7} \\
 F_{15-8} & \neq F_{10-8} \\
 F_{18-2} & \neq F_{13-2} \\
 F_{18-8} & \neq F_{13-8} \\
 F_{18-5} & \neq F_{13-5} \\
 F_{17-2} & \neq F_{10-8}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

2°) Les lingots tournent tous d'un même angle θ , donc :

$$\begin{aligned}
 F_{14-22} & \neq F_{9-17} = F_{16-10} \\
 F_{15-22} & = F_{22-15} = F_{10-17} = F_{17-10}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

3°) La distance séparant les lingots 1 et 2 de la paroi MQ est suffisamment grande pour pouvoir admettre que :

$$\begin{aligned}
 F_{18-3} & = F_{13-3} \\
 F_{9-3} & \neq F_{14-3} \neq 0
 \end{aligned}$$

Avec ces simplifications, le problème se résume à la détermination des facteurs géométriques relatifs au lingot 1 et aux parois 16 et 17 du lingot 2, lorsque θ varie de 0 à 27 degrés.

II-4.2 Etude des facteurs géométriques relatifs à chaque face de lingots

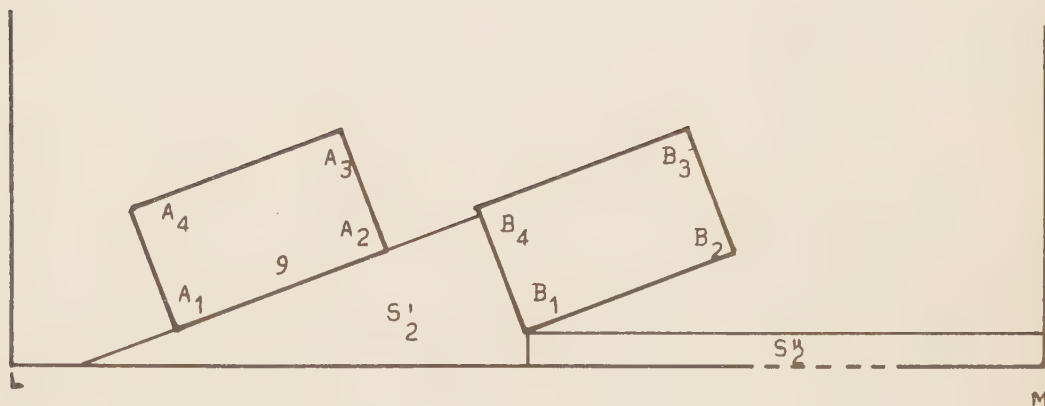
Toutes les courbes données aux figures 16, 18, 19, 20, 22, 23, sont tracées en coordonnées semi-logarithmiques.

II-4.2.1 Surface 9 du lingot 1

Les facteurs géométriques sont obtenus de la manière suivante :

- F_{9-2} grâce au programme A-II.8,
- F_{9-17} par A-II.2,
- F_{9-1} en utilisant A-II.7,

- F_{9-7} en découpant la sole en deux parties, S_2' et S_2'' suivant le schéma 15



- FIGURE 15 -

$F_{S_1-S_2'}$ est calculé de manière simple, $F_{S_1-S_2''}$ est déterminé en appliquant A-II.10, l'arête B_1 du lingot 2, étant la limite de la surface obstacle, supposée infiniment grande verticalement.

- F_{9-5} est déterminé en admettant que $F_{9-3} \neq 0$ grâce à l'égalité (20) :

$$F_{9-5} = 1 - (F_{9-7} + F_{9-17} + \dots)$$

La figure 16 donne l'évolution des facteurs géométriques lorsque θ varie de 0 à 27 degrés.

On constate que :

- 1°) F_{9-1} tend très vite vers 0,
- 2°) F_{9-17} nul pour $\theta = 0$, croît pour atteindre 0,1 si θ est de l'ordre de 27 degrés,
- 3°) F_{9-7} varie peu pour les valeurs de θ inférieures à 8 degrés, puis croît jusqu'à 0,075 pour θ de l'ordre de 26 degrés,

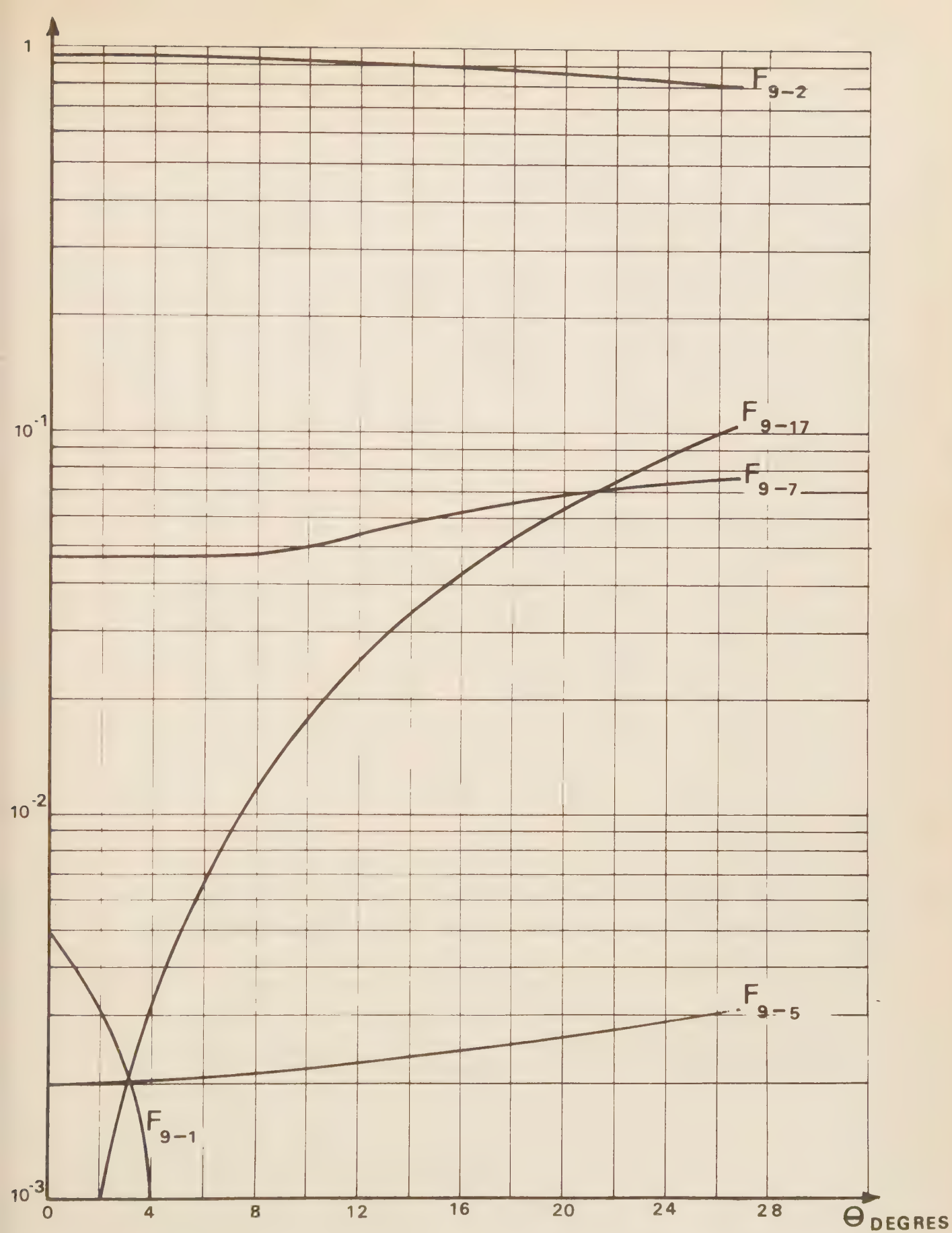


FIGURE 16

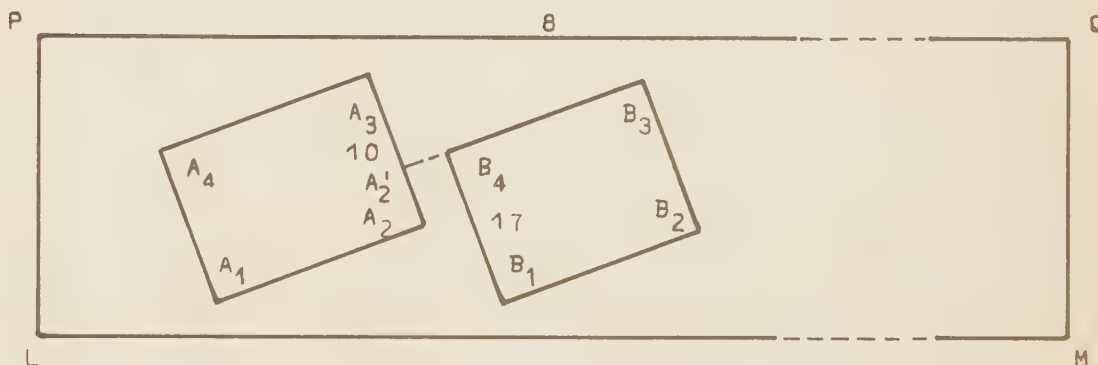
4°) F_{9-2} décroît constamment depuis 0,95 jusqu'à 0,80.

II-4.2.2 Surface 10 du lingot 1

- F_{10-17} , F_{10-16} sont déterminés en appliquant les résultats des annexes A-II.2 et A-II.1,

- F_{10-2} est obtenu grâce à A-II.8

- F_{10-8} est calculé en deux parties suivant la figure 17.



- FIGURE 17 -

Tout d'abord le programme A-II.8 est appliqué à $F_{A_2A_2'-PQ}$ avec pour obstacle le demi-plan limité par la verticale passant par B_4 . Puis, le même programme permet de calculer $F_{A_2'A_3-PQ}$ avec un demi plan obstacle, dont l'arête est constituée par la verticale passant par B_3 . La somme :

$$\frac{\text{Aire de la face } A_2A_2' \times F_{A_2A_2'-PQ} + \text{Aire de la face } A_2'A_3 \times F_{A_2'A_3-PQ}}{\text{Aire de la face } A_2A_3}$$

donne la valeur de F_{10-8} .

- F_{10-5} est obtenu par le programme F P E U C(A-II.10)

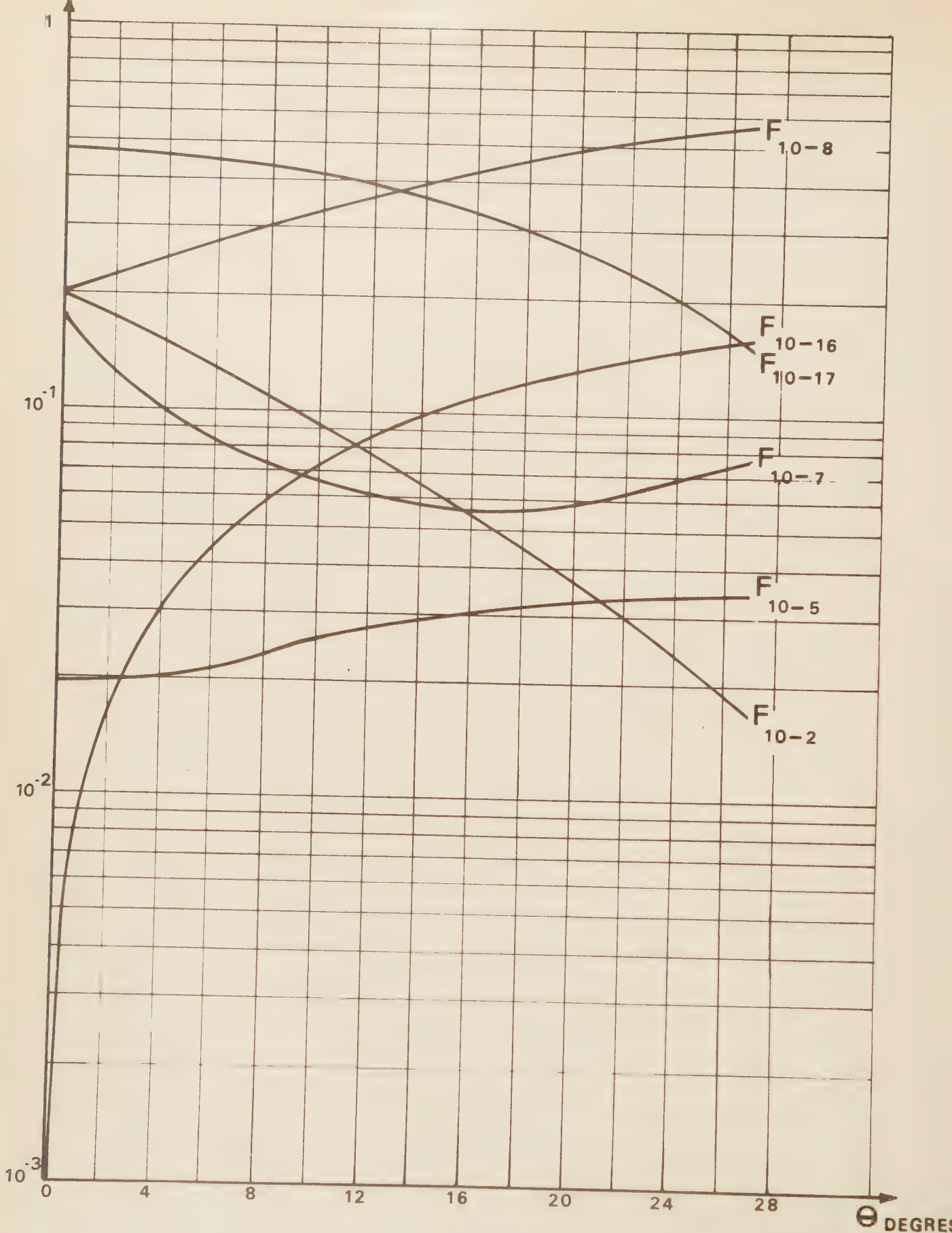


FIGURE 18

$-F_{10-3}$ très petit peut être négligé (de l'ordre de $3 \cdot 10^{-4}$) ; (20) permet de calculer F_{10-7} .

Les courbes relatives à cette paroi du lingot 1 sont tracées à la figure 18.

On remarque que :

1°) F_{10-16} croît pour atteindre 0,17 lorsque θ tend vers 27 degrés. De plus, la pente de la courbe est beaucoup plus importante pour les faibles abscisses.

2°) F_{10-7} passe par un minimum voisin de 0,056 pour 16 degrés.

3°) F_{10-17} décroît constamment.

4°) F_{10-5} varie faiblement pour les petites valeurs de θ et semble tendre vers une asymptote lorsque θ croît.

5°) F_{10-8} croît alors que F_{10-2} décroît ; ceci est parfaitement logique, compte tenu de la position relative des lingots 1 et 2.

6°) Les courbes F_{10-8} et F_{10-17} se coupent pour $\theta \approx 13$ degrés.

Enfin, il est à remarquer la constance de la somme $F_{10-16} + F_{10-17}$, lorsque θ varie de 0 à 27 degrés. Le facteur géométrique du lingot 2 depuis la paroi 10 du lingot 1 semble donc indépendant de l'inclinaison des lingots.

II-4.2.3 Surface 11 du lingot 1

Toutes les valeurs sont obtenues directement grâce aux programmes décrits à l'annexe II.

On constate que (Fig. 19) :

- F_{11-5} passe par un minimum pour une valeur de θ petite (4 degrés), puis croît de manière quasiment rectiligne entre 7 et 27 degrés (en coordonnées semi-logarithmiques).

- F_{11-7} semble passer également par un minimum pour θ de l'ordre de quatre degrés.

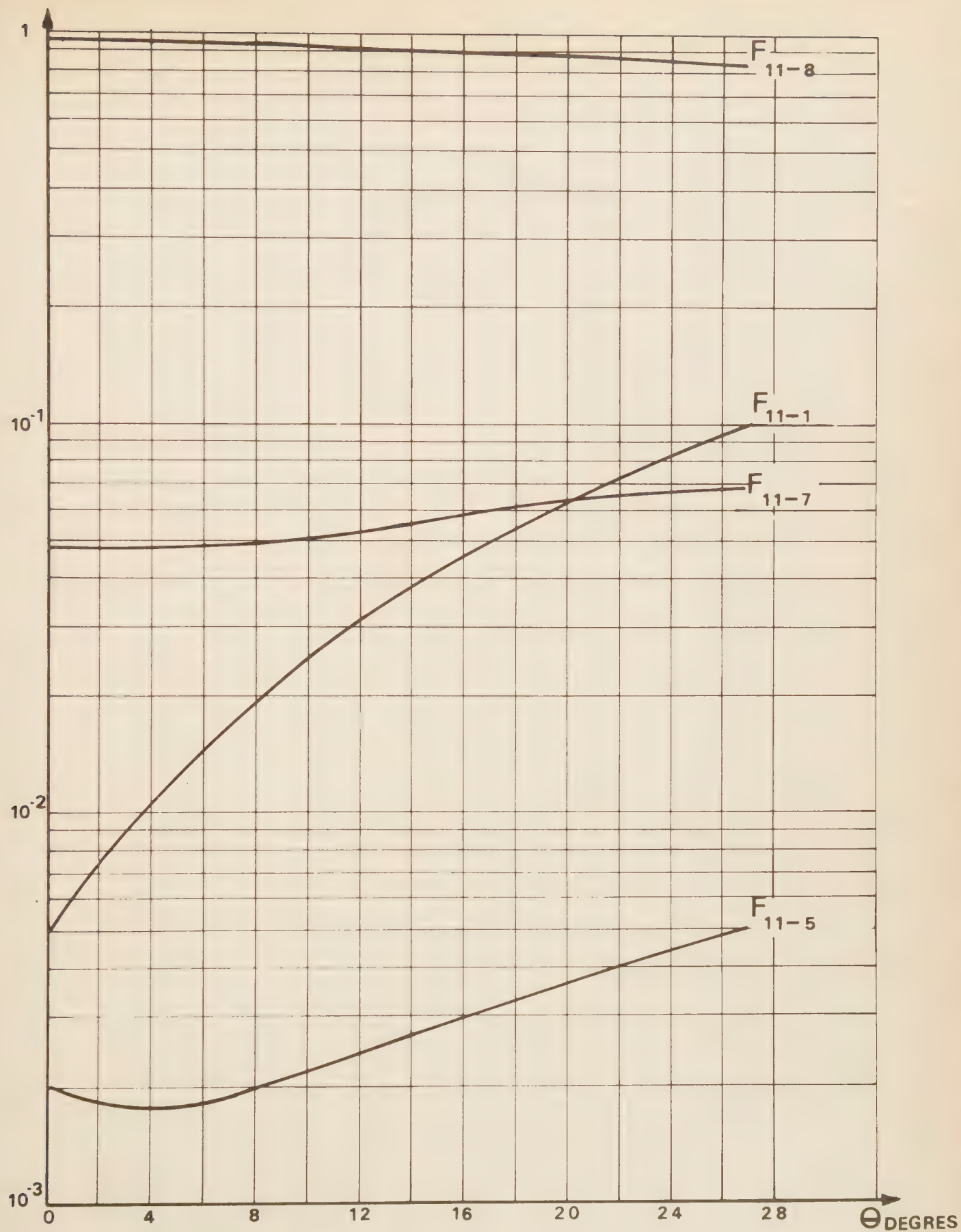


FIGURE 19

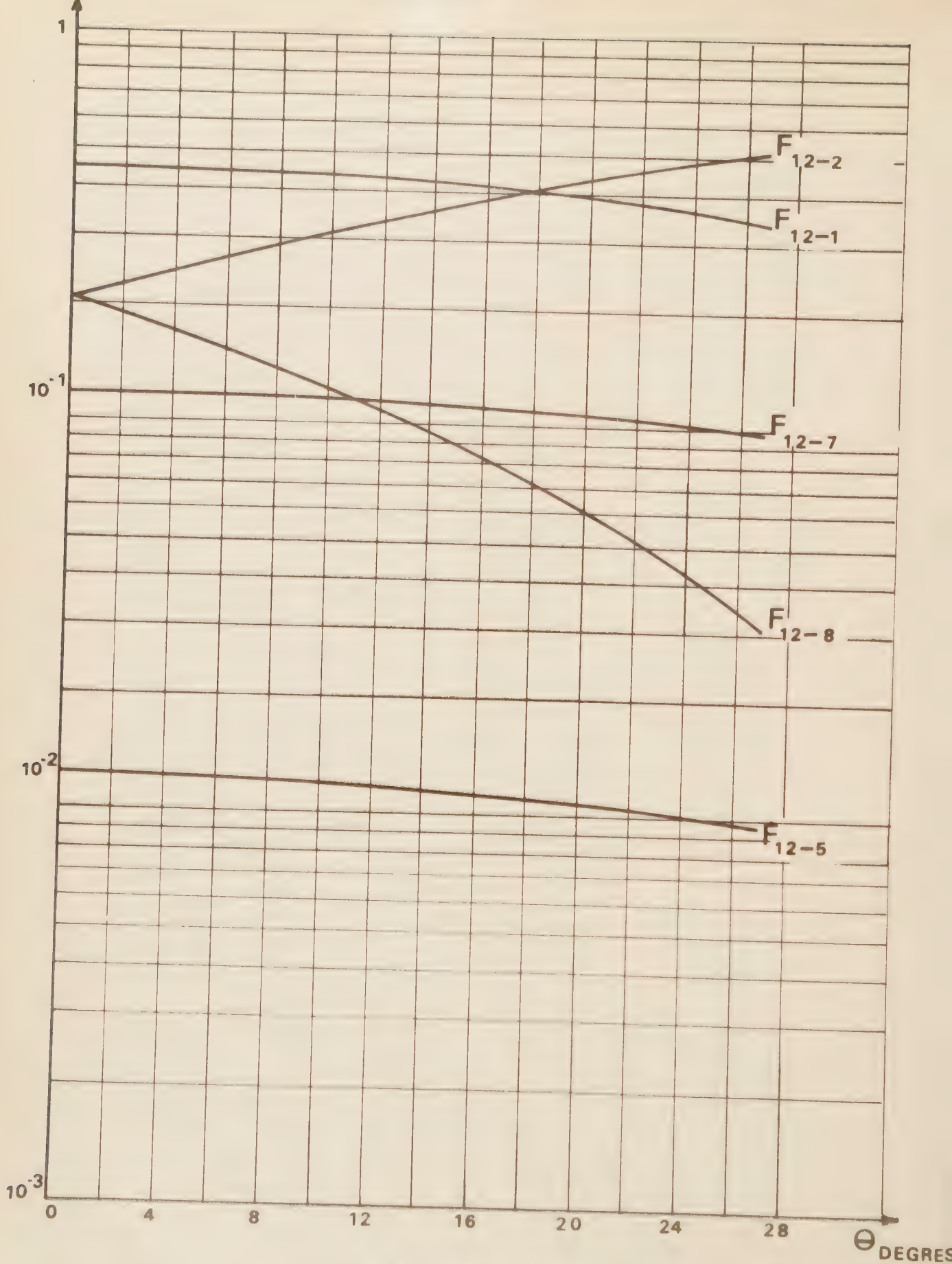


FIGURE 20

- F_{11-1} croît constamment depuis 0,005 jusqu'à 0,1 pour θ égal à 27 degrés.
- Inversement, F_{11-8} décroît de manière analogue à F_{9-2} .
- Enfin, F_{11-1} et F_{11-7} sont égaux pour θ voisin de 20 degrés.

II-4.2.4 Surface 12 du lingot 1

Les calculs sont réalisés de la même manière qu'au chapitre précédent. Les courbes de la figure 20, donnent les variations des facteurs d'angle relatifs à la surface 12.

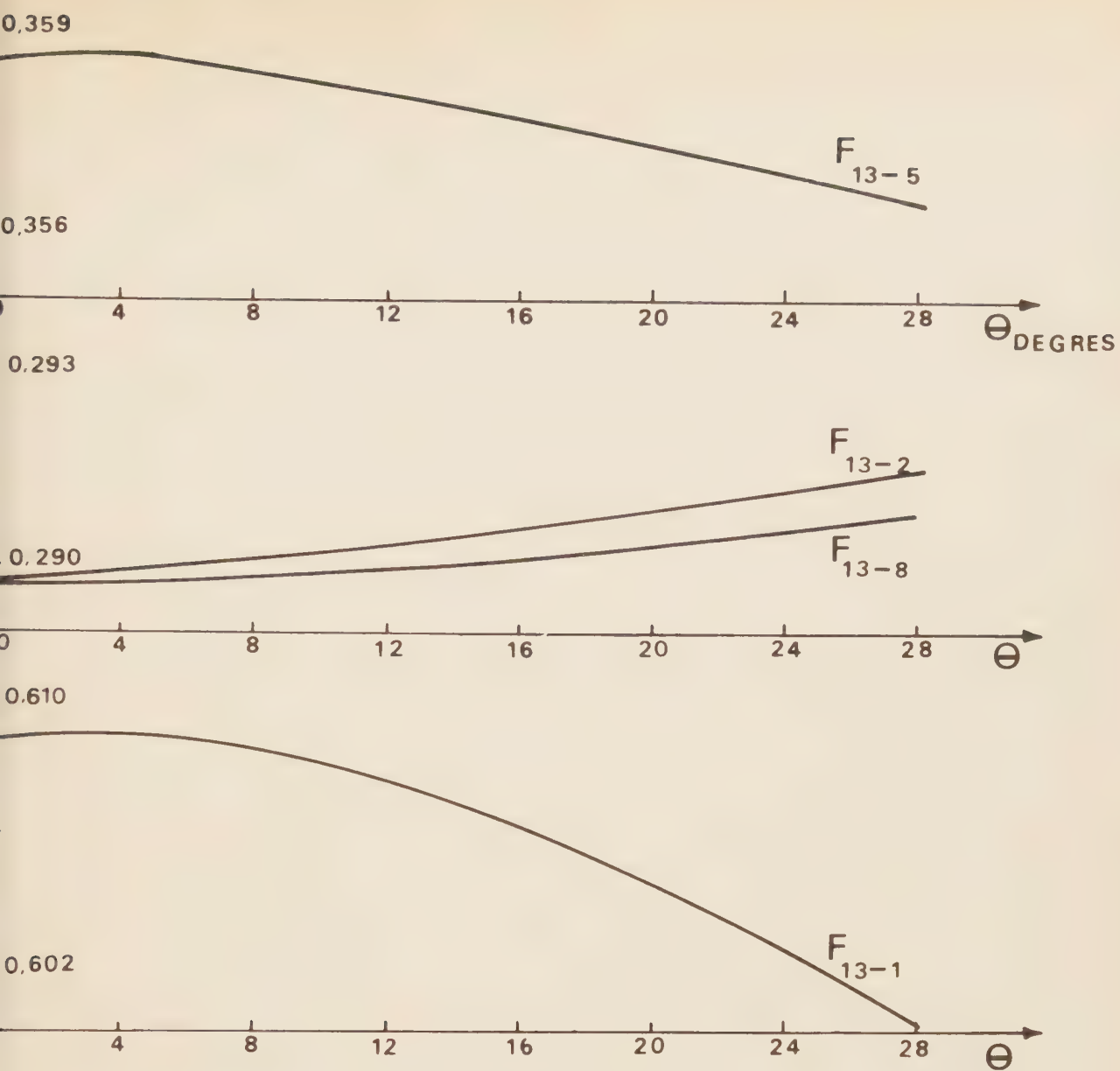
Nous constatons que :

- les trois courbes F_{12-1} , F_{12-5} et F_{12-7} semblent être toutes trois parallèles. Les valeurs prises par ces différents facteurs de vue, décroissent faiblement lorsque θ croît.
- F_{12-2} croît assez sensiblement avec θ , puisque cette fonction passe de 0,21 à 0,51, lorsque θ croît de 0 à 27 degrés.
- Par contre, F_{12-8} décroît constamment.
- Enfin, pour une inclinaison de 10 degrés, F_{12-8} est égal à F_{12-7} , alors que les courbes relatives à F_{12-2} et F_{12-1} se coupent pour un angle θ voisin de 18 degrés.

II-4.2.5 Surface 13, tête de lingot 1

Tous les résultats sont obtenus par application du seul programme F P A L P (A-II.5 et 6). Il est à remarquer que la somme des facteurs géométriques n'est pas exactement égale à 1 (1,0003). Cette légère différence est sans doute explicable par les erreurs de chute.

Le tableau et la figure 21, montrent que les variations des divers facteurs géométriques avec θ , sont faibles (0,3 %). Nous admettons que les facteurs d'angle relatifs à la tête du lingot 1 sont constants.



θ DEGRES	0	4	8	12	16	20	24	28
F_{13-8}	0,289782	0,289761	0,289797	0,289891	0,290066	0,290276	0,290558	0,290819
F_{13-2}	0,289782	0,289896	0,290042	0,290245	0,290518	0,290816	0,291175	0,291486
F_{13-5}	0,358436	0,358373	0,358253	0,358043	0,357735	0,357399	0,356967	0,356584
F_{13-1}	0,06088	0,06090	0,06083	0,06075	0,06061	0,06044	0,06023	0,06004
F_{13-3}	0,001371	0,001372	0,001371	0,001371	0,001370	0,001370	0,001370	0,001369

FIGURE 21

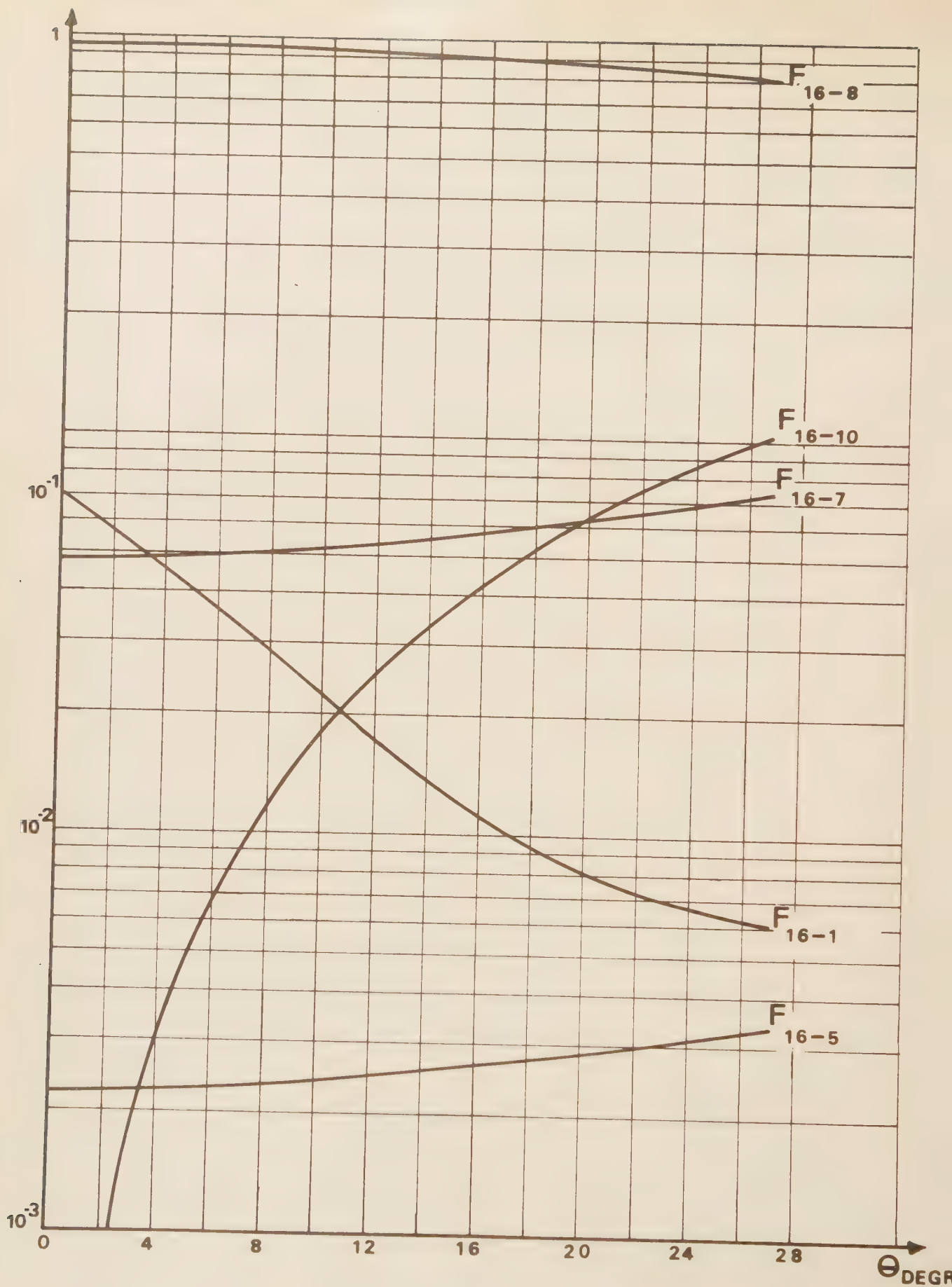


FIGURE 22

II-4.2.6 Surface 16 du lingot 2

- F_{16-7} est déterminé de la même manière que F_{9-7} .

Les autres valeurs des facteurs géométriques sont obtenues en utilisant directement les programmes décrits à l'annexe A-II.3. La valeur de F_{16-5} est calculée en appliquant la formule (20).

Les courbes (Fig. 22) ont une allure assez voisine de celles relatives à la surface 9. Cependant, il y a une courbe supplémentaire, correspondant à F_{16-1} , décroissante tout en tendant vers une asymptote.

Les conclusions sont voisines de celles du chapitre II-4.2.1.

II-4.2.7 Surface 17 du lingot 2

La figure 23 contient des courbes donnant l'évolution des facteurs géométriques relatifs à la surface 17. La tabulation est obtenue de la même façon qu'en II-4.2.2.

On constate que :

- F_{17-1} et F_{17-7} passent tous deux par un minimum ; l'un pour θ voisin de 10 degrés, l'autre pour un angle de 17 degrés.

- F_{17-9} croît depuis la valeur nulle, jusqu'à 0,17 pour θ de l'ordre de 27 degrés.

- Les facteurs de vue vers 2 et 8 croissent et décroissent respectivement.

- La courbe décrivant l'évolution de F_{17-10} , décroît et coupe F_{17-9} pour $\theta = 26,5$ degrés.

- Enfin, on constate que les valeurs de F_{17-9} , F_{17-7} et F_{17-8} sont voisines pour un angle θ compris entre 10 et 14 degrés, il en est de même pour F_{17-10} et F_{17-2} .

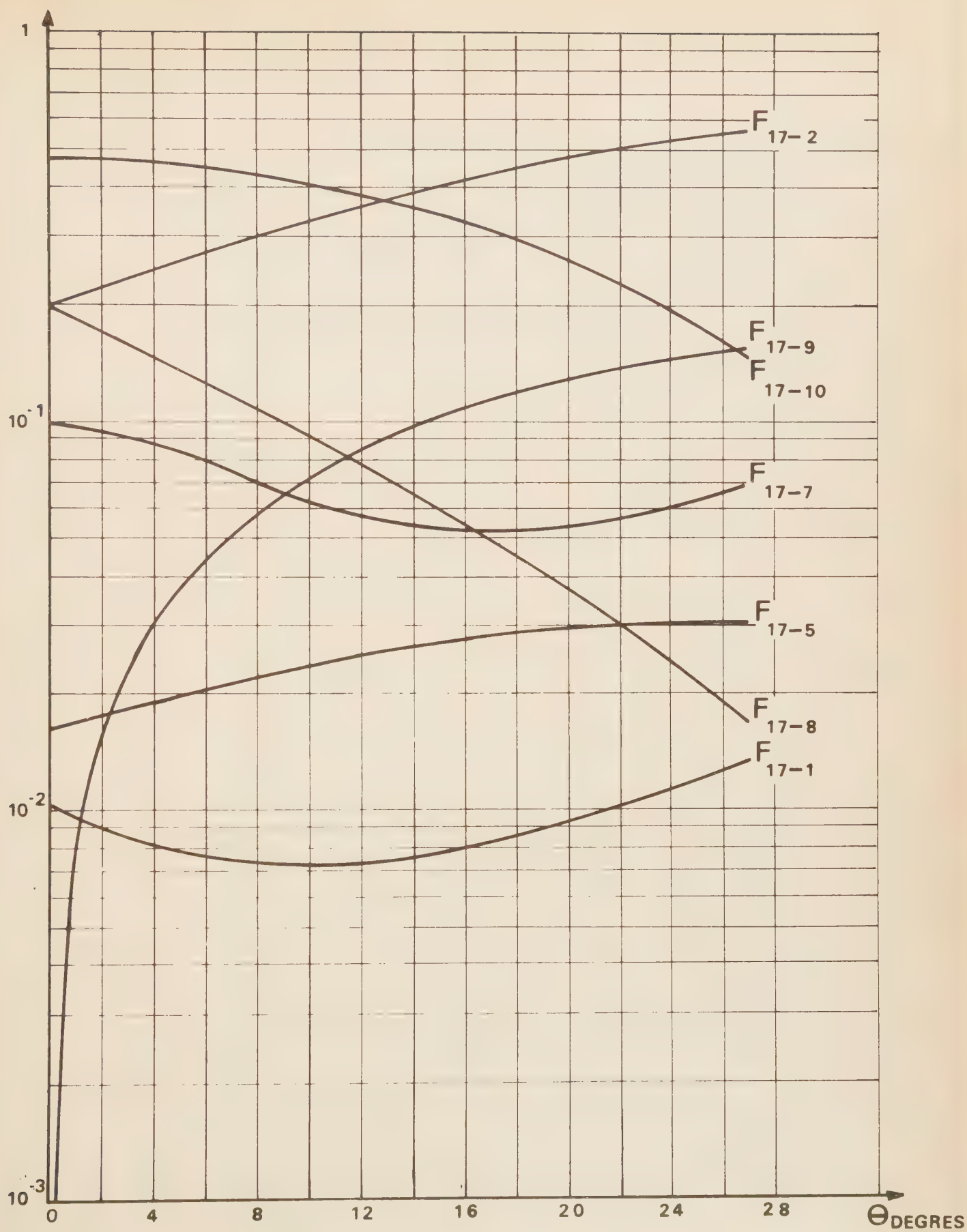


FIGURE 23

II-4.2.8 Conclusions sur l'évolution des facteurs géométriques en fonction de θ

De manière générale les courbes suggèrent les conclusions suivantes :

1°) lorsque l'angle d'inclinaison croît, les facteurs géométriques entre lingots croissent,

2°) les facteurs géométriques relatifs aux têtes des lingots sont indépendants de l'angle d'inclinaison,

3°) la valeur globale du facteur géométrique du lingot 2 depuis la paroi 10, ainsi que celle du lingot 1 depuis la face 17, sont indépendantes de l'inclinaison.

Enfin, l'échange direct entre deux surfaces i et j :

$$Q_{i-j} = A_i F_{i-j} \epsilon_i \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (28)$$

croîtra lorsque F_{ij} augmente donc on pourra faire varier la valeur de l'échange direct en changeant l'orientation des lingots.

III - BILAN DES ENERGIES RAYONNEES A L'INTERIEUR DE LA CELLULE

Des calculs rapides effectués à SOLLAC semblent montrer qu' environ 80 % du transfert thermique est dû au rayonnement. Compte tenu des données dont nous disposons, il a été impossible de tenir compte du rayonnement des gaz dans l'enceinte [25, 26]. D'autre part, nous ne développerons aucune étude en ce qui concerne le rayonnement de la flamme. En effet, pour obtenir une précision suffisamment fine, il serait nécessaire de connaître en chaque point de la flamme, la composition exacte des gaz, la température, la concentration en particules de carbone.... Ceci revient à la détermination d'un modèle mathématique de la flamme. Or LOISON [31] montre la complexité du problème, qui à lui seul peut justifier un travail de recherche.

Le problème est donc limité à la détermination des énergies échangées par rayonnement entre les différentes parois du four et les faces des lingots, sans tenir compte de la présence de gaz plus ou moins opaque au rayonnement.

En effet, une évaluation [24] montre que pour une épaisseur de 1,25 mètre d'un mélange gazeux contenant 15 % de CO_2 et 7 % de vapeur d'eau à 1500°C , le facteur d'absorption est de l'ordre de 0,15.

Le procédé de calcul utilisé est le suivant : on fixe les températures des faces des lingots et, moyennant un certain nombre d'hypothèses, on détermine en régime permanent, d'une part les températures des parois réfractaires, d'autre part la valeur des énergies calorifiques échangées par rayonnement entre les différents éléments de surface de la cellule.

III-1 Généralités

Dans tout ce qui suit, on suppose que les surfaces sont grises, qu'elles diffusent et rayonnent de manière uniforme. En effet, on peut admettre que, pour des réfractaires ou des surfaces métalliques très fortement oxydées, et à haute température, les indicatrices d'émissions sont proches de celles obtenues par la loi de LAMBERT (Fig. 24).

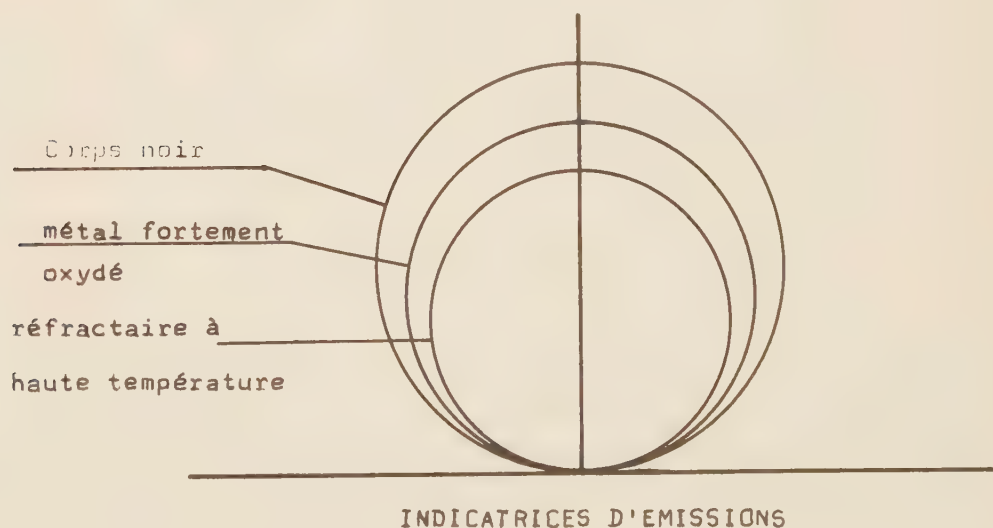


FIGURE 24

Trois méthodes numériques peuvent être envisagées. Les deux premières nécessitent la connaissance des températures de tous les éléments du four, il s'agit des méthodes de réseaux maillés, et

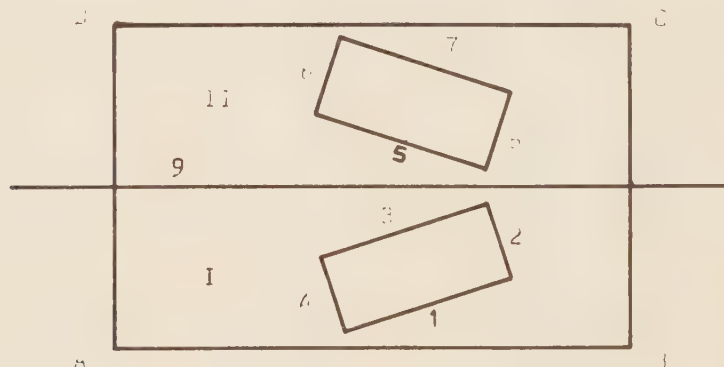
de GEBHART [30]. Il est impossible d'employer ici ces deux principes de détermination. La méthode que nous utiliserons est due à HOTTEL [24, 27, 30].

De plus, compte tenu des symétries admises en ce qui concerne :

- la distribution géométrique des lingots,
- la répartition des températures,
- la distribution des qualités optiques des parois,

on peut étudier le problème sur une demi-cellule, en admettant que le plan de symétrie est remplacé par une paroi fictive PQ purement réfléchissante.

En effet, considérons une enceinte ABCD rectangulaire, contenant deux parallélépipèdes répartis suivant la symétrie indiquée ci-dessus.

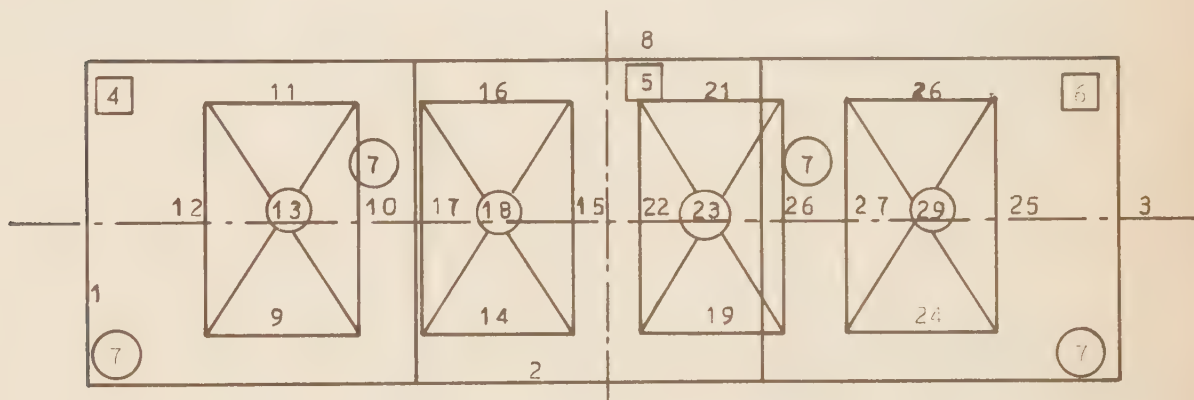


Soit 9 la paroi fictive qui remplace le plan de symétrie, les lois de DESCARTES permettent d'écrire que l'énergie rayonnée dans la partie 1 du four par la face 6, est identique à l'énergie rayonnée par la paroi 2, en admettant que la paroi fictive est purement réfléchissante. Il en serait de même pour deux éléments quelconques disposés symétriquement par rapport à la paroi 9. De plus, dans la détermination des températures et des énergies échangées par rayonnement, on tient compte des réflexions multiples entre toutes les surfaces constitutives du four, et en particulier entre une surface quelconque et la surface purement réfléchissante. Il est possible d'écrire :

$$Q_{2-5} \text{ (four complet)} = Q_{6-3} \text{ (four complet)} = Q_{2-3} \text{ (demi-cellule)}$$

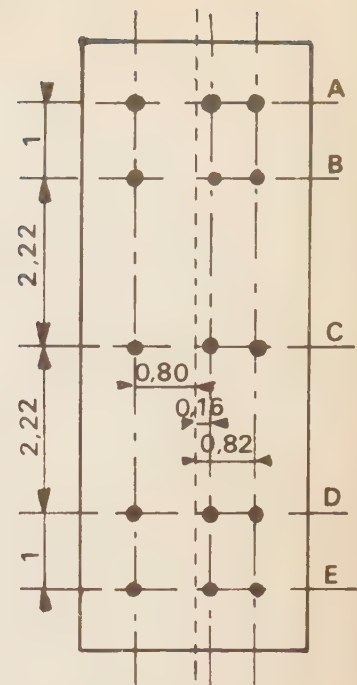
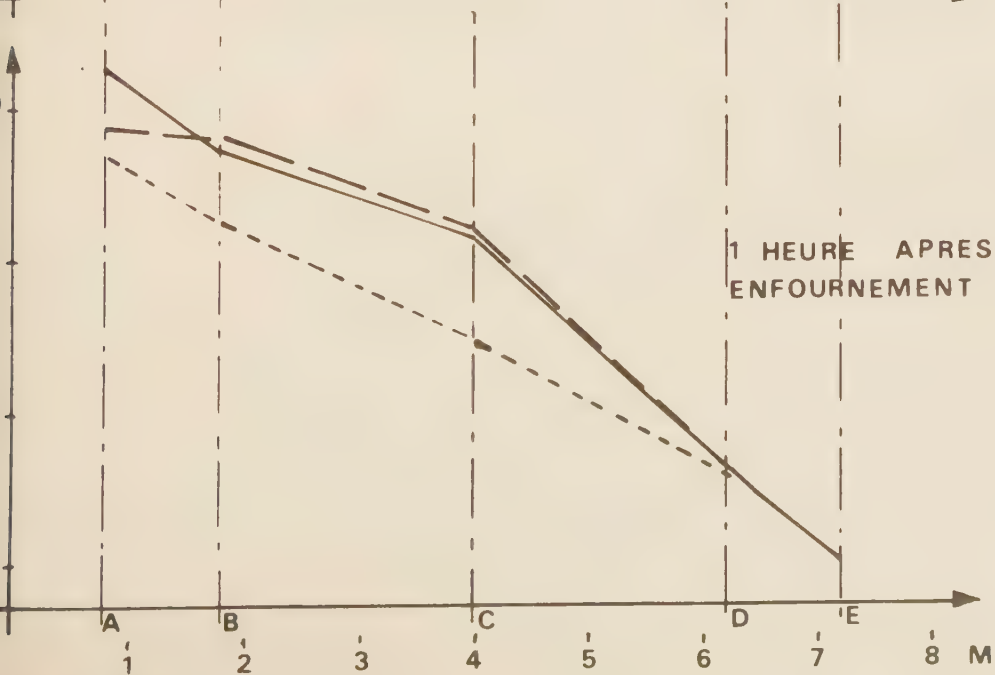
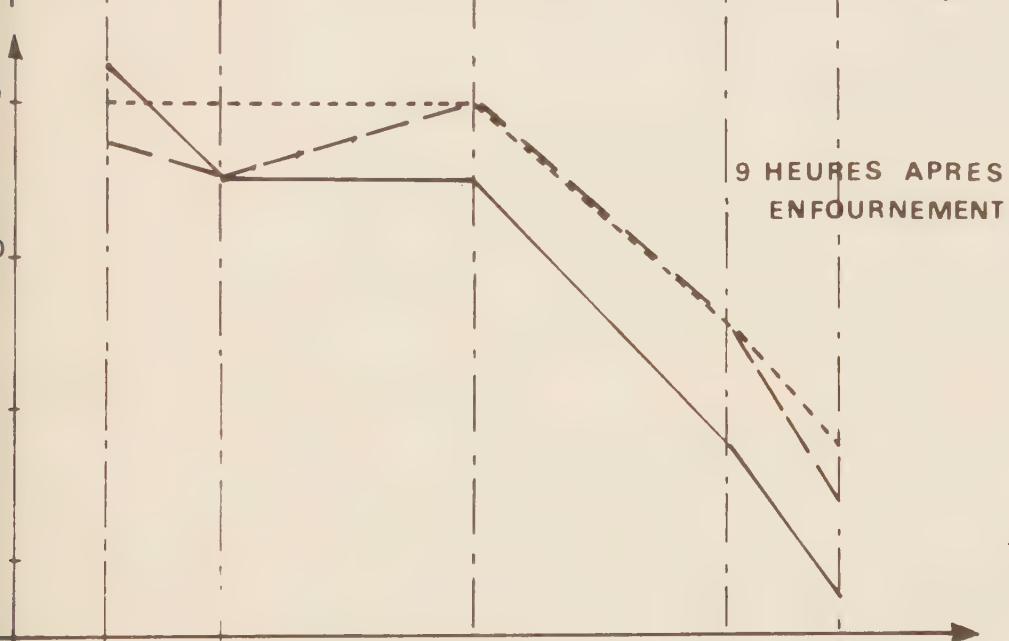
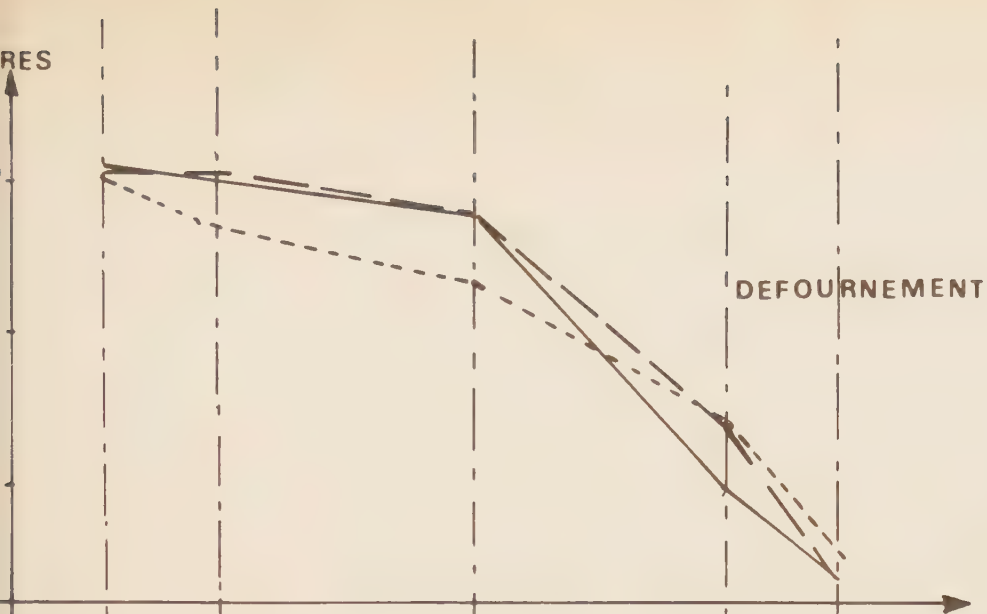
Tous les types de calculs sont basés sur des méthodes discrètes, il est donc nécessaire de se fixer un découpage des différentes parois de la cellule.

Dans le cas actuel, le four est morcelé en 28 éléments, ce qui nous a obligé à calculer complètement la matrice 28×28 des facteurs géométriques, sans faire les simplifications du chapitre II (26, 27). La voûte est décomposée en trois parties à température uniforme (surfaces 4, 5, 6 du schéma 25).



- FIGURE 25 -

Cette décomposition a été suggérée par les courbes de la figure 26 (relevé de température sur la voûte au cours de différents types de chauffe). Les parois longitudinales, la paroi arrière, ainsi que la sole sont supposées à température constante et uniforme. Pour la paroi avant, on fait la même hypothèse qu'en II-4.1 sur l'état de rayonnement des surfaces des carnaux et du brûleur. Chaque lingot, de température uniforme, est décomposé en cinq parties : 4 surfaces latérales et la surface supérieure.



POSITION DES
THERMOCOUPLES SUR
LE COUVERCLE DU
FOUR

FIGURE 26
TEMPERATURE DE LA VOUTE

III-2 Méthode utilisée

Dans [24], HOTTEL admet que l'énergie calorifique apportée aux réfractaires par convection est égale aux pertes par conduction dans les parois du four. Aucune justification théorique ne peut être donnée à cette hypothèse. Cependant, dans le domaine de température concerné, les thermiciens pensent que cette hypothèse est assez bien vérifiée, d'autre part des mesures approchées montrent que ces énergies sont voisines. Le bilan des énergies échangées par rayonnement entre la surface intérieure d'une paroi réfractaire et le reste de la cellule est nul. Ceci revient à supposer que la paroi réfractaire n'échange aucune énergie par rayonnement avec le reste de la cellule. Le four chargé est constitué de 28 éléments dont 7 surfaces réfractaires (1, 2, 3, voûte (4, 5, 6), 7), une surface réfléchissante 8 et 20 parois métalliques (fig. 25). On admet l'uniformité du rayonnement sur chaque surface arbitrairement choisie, aussi bien pour les énergies rayonnées que pour les facteurs d'émission et d'absorption.

- Les notations employées ci-dessous sont décrites au début du mémoire.

En régime permanent le flux net issu de la surface 1 (S_1) est la somme des échanges mutuels avec les surfaces $S_2, \dots, S_{28}$. Il en est de même pour toutes les autres surfaces. D'autre part, le flux net échangé entre S_1 et S_2 est, d'une part le flux direct échangé entre S_1 et S_2 , d'autre part le flux échangé entre les autres surfaces et S_1 et S_2 .

Supposons que S_1 soit un corps noir ($\epsilon = 1$). Sur chaque surface, le flux émis et reçu, sera dû à la réflexion du rayonnement émis par S_1 , qui met en jeu les réflexions des autres surfaces. Soit ${}_i\phi_j$ le flux rayonné par unité de surface j , l'indice i indiquant la provenance de l'énergie rayonnée (il s'agit d'une densité relative de flux, diminuée dans le rapport $1/\sigma T^4$) la densité de flux s'éloignant de S_1 est ${}_1\phi_1 + \epsilon_1$.

Le rayonnement absorbé par S_2 est dû au faisceau émis par les diverses surfaces vues par cette dernière, et chaque rayon incident sera partiellement absorbé ou réfléchi dans le rapport $\epsilon_2/(1-\epsilon_2)$, donc la quantité totale absorbée est :

$$S_1 \mathcal{F}_{1-2} = {}_1\varpi_2 S_2 \frac{\epsilon_2}{1 - \epsilon_2} \quad (29)$$

L'effet sur S_1 du rayonnement émis par $S_2 S_3 \dots$ et par S_1 , donne une valeur dont la fraction $1 - \epsilon_1$ réfléchie, est égale au flux s'éloignant de S_1 , diminuée de ce qui est émis au début ($S_1 {}_1\varpi_1$). Il est possible d'écrire :

$$[{}_1 F_{1-1} (\epsilon_1 + {}_1\varpi_1) + S_2 F_{2-1} {}_1\varpi_2 + \dots] (1 - \epsilon_1) = S_1 {}_1\varpi_1 \quad (30)$$

ainsi que des relations identiques pour les autres surfaces.

Posons $S_1 F_{1-i} = S_i F_{i-1} = \overline{1-i}$, et admettons que $\epsilon_i = 1 - \rho_i$, alors (30) peut s'écrire :

$$(31) \left\{ \begin{array}{l} (\overline{1-1} - \frac{S_1}{\rho_1}) {}_1\varpi_1 + \overline{1-2} {}_1\varpi_2 + \overline{1-3} {}_1\varpi_3 + \dots + \overline{1-28} {}_1\varpi_{28} = -\overline{1-1} \epsilon_1 \\ \overline{1-2} {}_1\varpi_1 + (\overline{2-2} - \frac{S_2}{\rho_2}) {}_1\varpi_2 + \overline{2-3} {}_1\varpi_3 + \dots + \overline{2-28} {}_1\varpi_{28} = -\overline{1-2} \epsilon_1 \\ \overline{1-28} {}_1\varpi_1 + \overline{2-28} {}_1\varpi_2 + \overline{3-28} {}_1\varpi_3 + \dots + (\overline{28-28} - \frac{S_{28}}{\rho_{28}}) {}_1\varpi_{28} = -\overline{1-28} \epsilon_1 \end{array} \right.$$

ce qui conduit à un système de 28 équations à 28 inconnues ${}_1\varpi_i$, que nous mettons sous la forme matricielle

$$[A_1] [{}_1\varpi_J] = [R_1] \quad (32)$$

On obtient ainsi 28 systèmes d'équations relatif, à chacun des 28 éléments de surface arbitrairement choisis. La résolution de ces systèmes d'équations permet d'aboutir aux valeurs de ${}_i\varpi_J$ puis grâce à 29 à celles de $\mathcal{F}_{iJ}$.

Ensuite, on écrit que l'énergie totale reçue par chacune des surfaces réfractaires est nulle :

$$Q_{\text{net-k}} = S_k \sum_{J=1}^{28} \mathcal{F}_{J-k} (E_J - E_k) \quad (33)$$

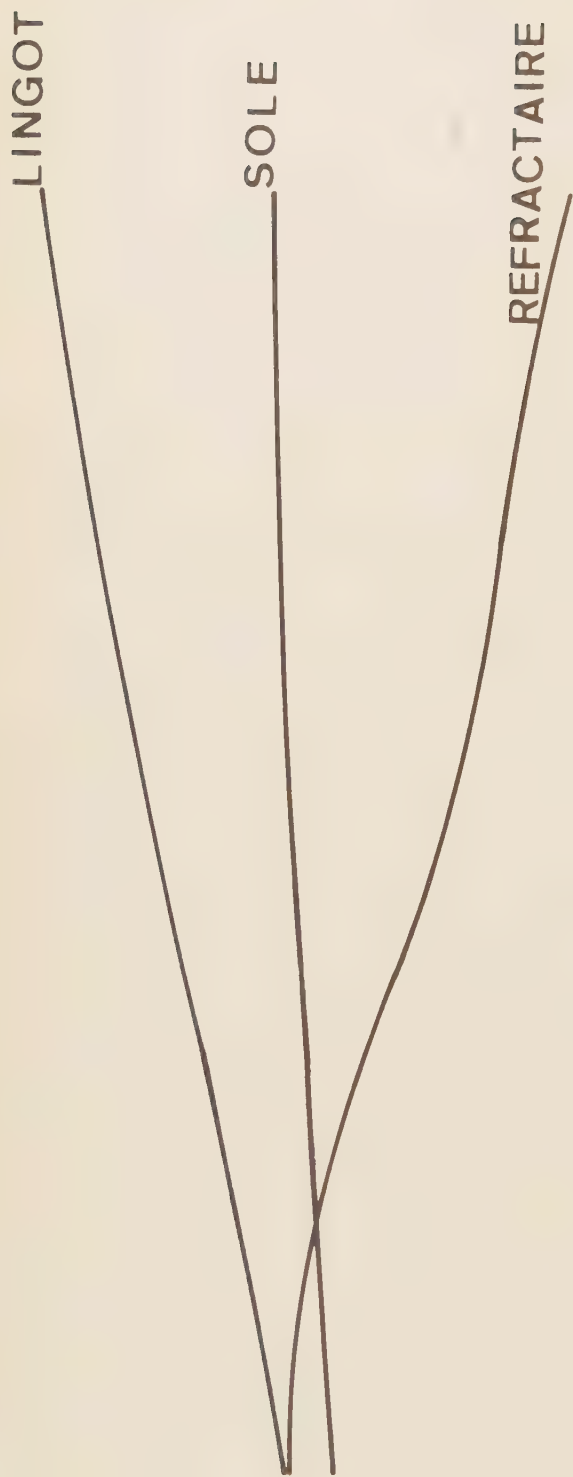


FIGURE 27

On aboutit ainsi, à un nouveau système de 7 équations à 7 inconnues :

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{28} \mathcal{F}_{1-j} - \mathcal{F}_{1-1}, -\mathcal{F}_{1-2}, -\mathcal{F}_{1-3}, \dots, \mathcal{F}_{1-7} \\ -\mathcal{F}_{2-1}, \sum_{j=1}^{28} \mathcal{F}_{2-j} - \mathcal{F}_{2-2}, -\mathcal{F}_{2-3}, \dots, \mathcal{F}_{2-7} \\ \vdots \\ -\mathcal{F}_{7-1}, -\mathcal{F}_{7-2}, \dots, \sum_{j=1}^{28} \mathcal{F}_{7-j} - \mathcal{F}_{7-7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{b_1} \\ E_{b_2} \\ \vdots \\ E_{b_7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=8}^{28} \mathcal{F}_{1-i} & E_{b_i} \\ \sum_{i=8}^{28} \mathcal{F}_{2-i} & E_{b_i} \\ \vdots & \vdots \\ \sum_{i=8}^{28} \mathcal{F}_{7-i} & E_{b_i} \end{bmatrix} \quad (34)$$

dont la solution est constituée par les valeurs de E_{b_i} , pouvoirs émissifs d'un corps noir à la température T_i .

La température des réfractaires étant inconnue, la méthode employée est la suivante :

fixons : $T_1^1, T_2^1, \dots, T_7^1$ températures des réfractaires,

les courbes de la figure 27 permettent d'en déduire les facteurs d'émission $\epsilon_1^1, \dots, \epsilon_7^1$.

En résolvant les systèmes (32), on détermine les valeurs des flux, ainsi que celles des facteurs géométriques globaux. Puis la résolution du système 34 conduit aux valeurs de E_b , permettant ainsi une nouvelle détermination des températures des réfractaires ($T_1^2, \dots, T_7^2$). On reporte ces nouvelles valeurs au début du travail et ainsi de suite jusqu'à convergence du processus itératif. On peut admettre que les résultats sont valables lorsque l'écart entre deux itérations successives est inférieur à 10^{-3} degrés.

Numériquement, la méthode se traduit par un programme relativement volumineux où la résolution des systèmes d'équations est effectuée par une méthode du pivot maximum.

III-3 Evolution des flux calorifiques net rayonnés en fonction de l'inclinaison des lingots par rapport à l'axe longitudinal de la cellule

Les calculs sont effectués pour quatre lingots HB, disposés dans la demi-cellule. Le positionnement est voisin de celui du chapitre précédent. Cependant, les axes verticaux des lingots, disposés dans le plan de symétrie longitudinal de la cellule, sont tels que

- la distance entre l'axe du premier lingot et la paroi avant soit égale à 1,58 mètre,
- la distance entre chaque axe vertical successif, soit de 1,66 mètre.

La cellule est identique à celle du chapitre II.

Aucune mesure du facteur d'émission des réfractaires en fonction de la température ne figurant dans les essais courants des constructeurs, nous utiliserons les courbes de la figure 27, déduites de [27] et [30].

On a vu (III introduction) que la température des lingots était préalablement choisie, dans le cas actuel

$$\begin{aligned} T_9, T_{10} \dots\dots\dots T_{13} &= 1250 \text{ degrés} \\ T_{14}, \dots\dots\dots T_{18} &= 1240 \text{ degrés} \\ T_{19}, \dots\dots\dots T_{23} &= 1230 \text{ degrés} \\ T_{24}, \dots\dots\dots T_{28} &= 1220 \text{ degrés} \end{aligned}$$

seront respectivement les températures des lingots 1, 2, 3, et 4.

Les facteurs géométriques sont calculés de manière beaucoup plus complète qu'en II.

Les figures 28 et 29 déduites du tableau 11A sont données à titre purement indicatif, dans le but de faciliter la lecture de ce mémoire. En effet, compte tenu de la longueur des calculs (détermination des valeurs de la matrice 28 x 28, des facteurs géométriques)

Sur- face	$\theta=0$ Cellule réhaussée de 40 cm	$\theta=0$ Cellule standard	$\theta=7^\circ$ Cellule standard	$\theta=14^\circ$ Cellule standard
1	1,55	1,16	1,50	1,23
2	17,7	16,4	15,4	13,5
3	1,53	1,56	1,54	1,22
4	0,54	0,70	1,02	0,99
5	0,99	1,07	0,91	1,15
6	0,30	0,98	0,86	1,08
7	2,28	2,25	4,03	2,98
8	0	0	0	0
9	- 25 700	- 25 700	- 25 690	- 25 500
10	- 15 100	- 15 090	- 15 200	- 15 500
11	- 25 700	- 25 690	- 25 640	- 25 560
12	- 16 700	- 16 500	- 16 600	- 16 700
13	- 9 190	- 9 000	- 8 990	- 9 090
14	- 8 260	- 8 320	- 8 360	- 8 560
15	- 8 110	- 8 110	- 8 070	- 7 860
16	- 8 260	- 8 300	- 8 100	- 7 420
17	1 710	1 780	1 550	855
18	- 2 960	- 2 910	- 2 910	- 2 930
19	8 740	8 730	8 530	7 930
20	- 1 270	- 1 300	- 1 060	- 395
21	8 740	8 710	8 840	9 040
22	8 300	8 290	8 260	8 100
23	3 130	3 080	3 080	3 100
24	25 300	25 300	25 200	25 100
25	16 100	15 970	16 070	16 070
26	25 300	25 200	25 300	25 100
27	14 700	14 700	14 900	15 200
28	9 010	8 930	8 870	8 890

Tableau 11A

Echange thermique global pour chaque paroi en Watts

Sur- face	$\theta=0^\circ$ Cellule haute	$\theta=0^\circ$ Cellule basse	$\theta=7^\circ$ Cellule basse	$\theta=14^\circ$ Cellule basse
1	1237.53	1237.79	1237.79	1237.80
2	1235.17	1235.17	1235.16	1235.13
3	1232.52	1232.21	1232.23	1232.18
4	1236.50	1237.09	1237.01	1237.17
5	1235.21	1235.23	1235.21	1235.23
6	1233.76	1233.26	1233.30	1233.13
7	1235.16	1235.15	1235.19	1235.32
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1250.00	1250.00	1250.00	1250.00
10	1250.00	1250.00	1250.00	1250.00
11	1250.00	1250.00	1250.00	1250.00
12	1250.00	1250.00	1250.00	1250.00
13	1250.00	1250.00	1250.00	1250.00
14	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00
15	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00
16	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00
17	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00
18	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00
19	1230.00	1230.00	1230.00	1230.00
20	1230.00	1230.00	1230.00	1230.00
21	1230.00	1230.00	1230.00	1230.00
22	1230.00	1230.00	1230.00	1230.00
23	1230.00	1230.00	1230.00	1230.00
24	1220.00	1220.00	1220.00	1220.00
25	1220.00	1220.00	1220.00	1220.00
26	1220.00	1220.00	1220.00	1220.00
27	1220.00	1220.00	1220.00	1220.00
28	1220.00	1220.00	1220.00	1220.00

Tableau 11B
Température des éléments de surfaces en $^\circ\text{C}$

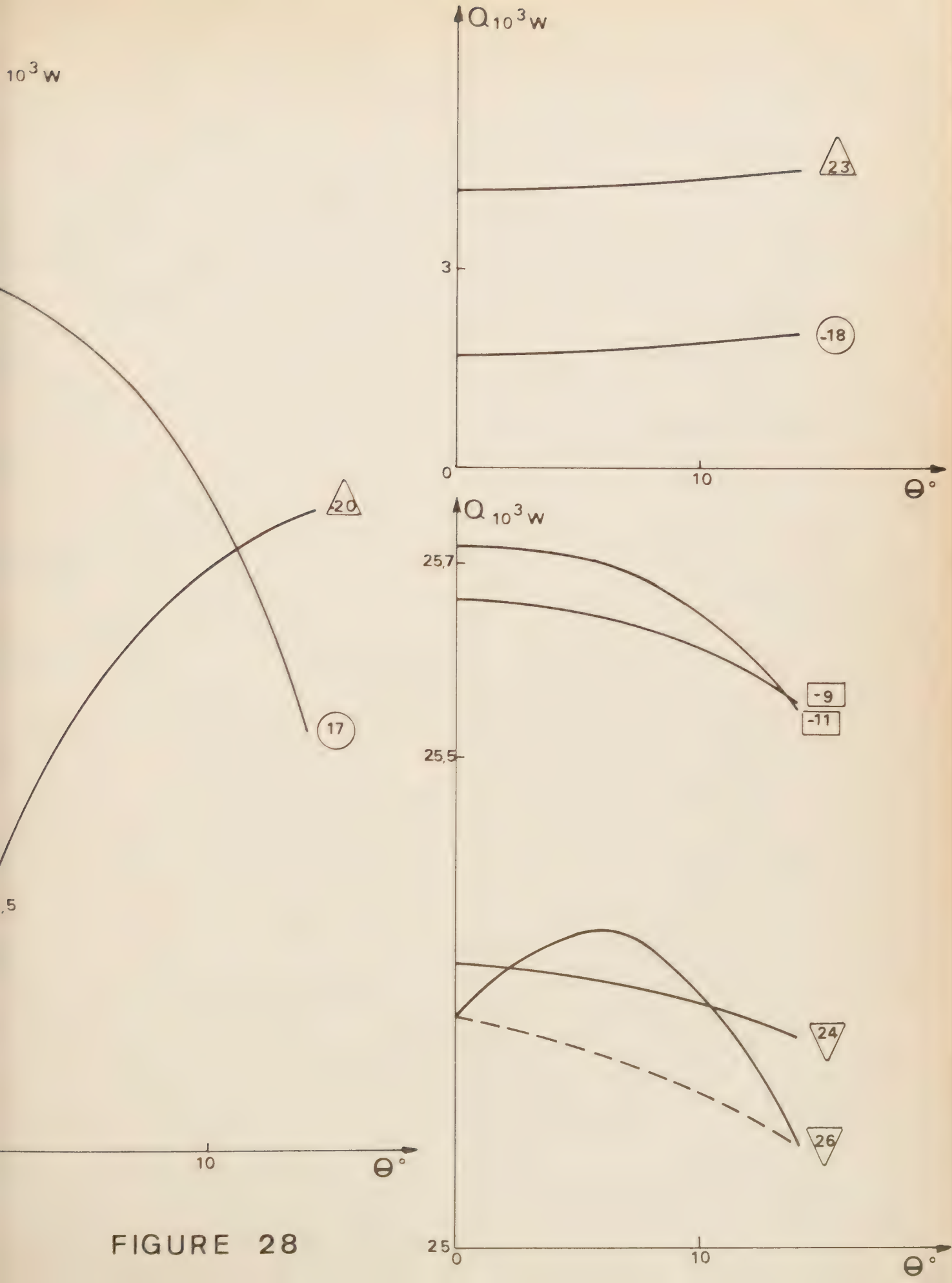


FIGURE 28

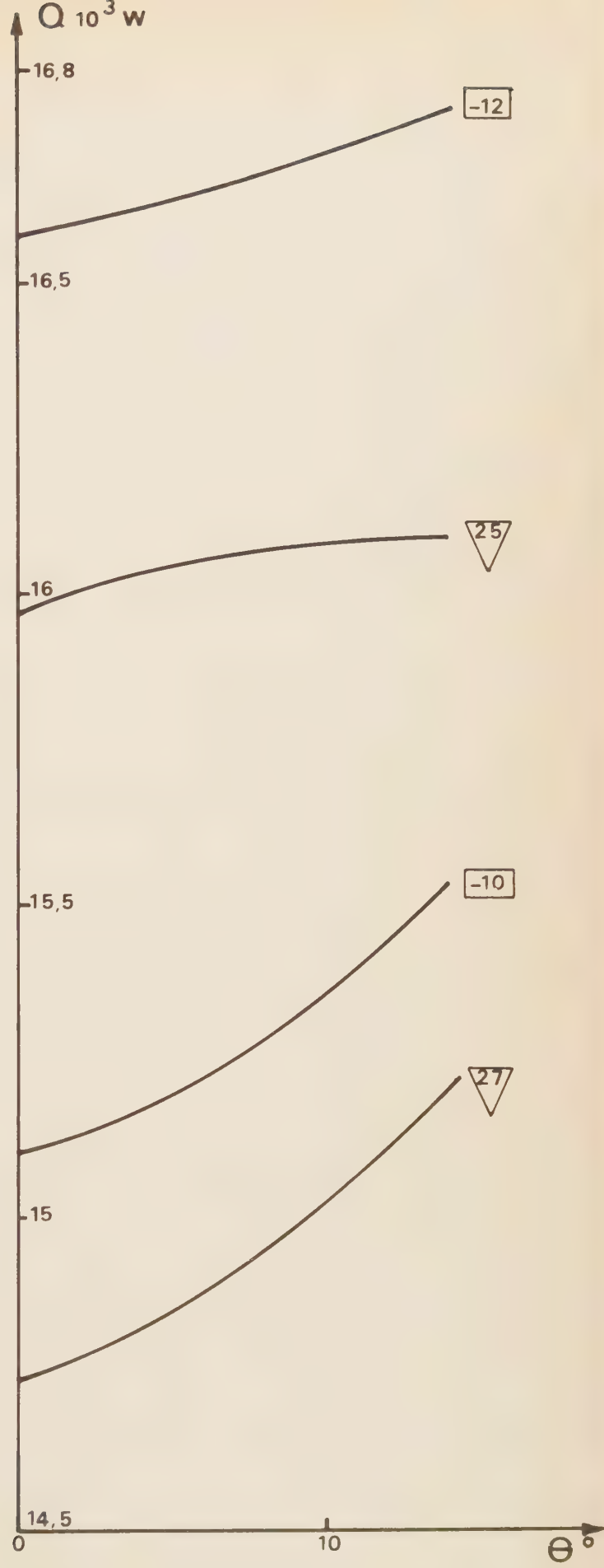
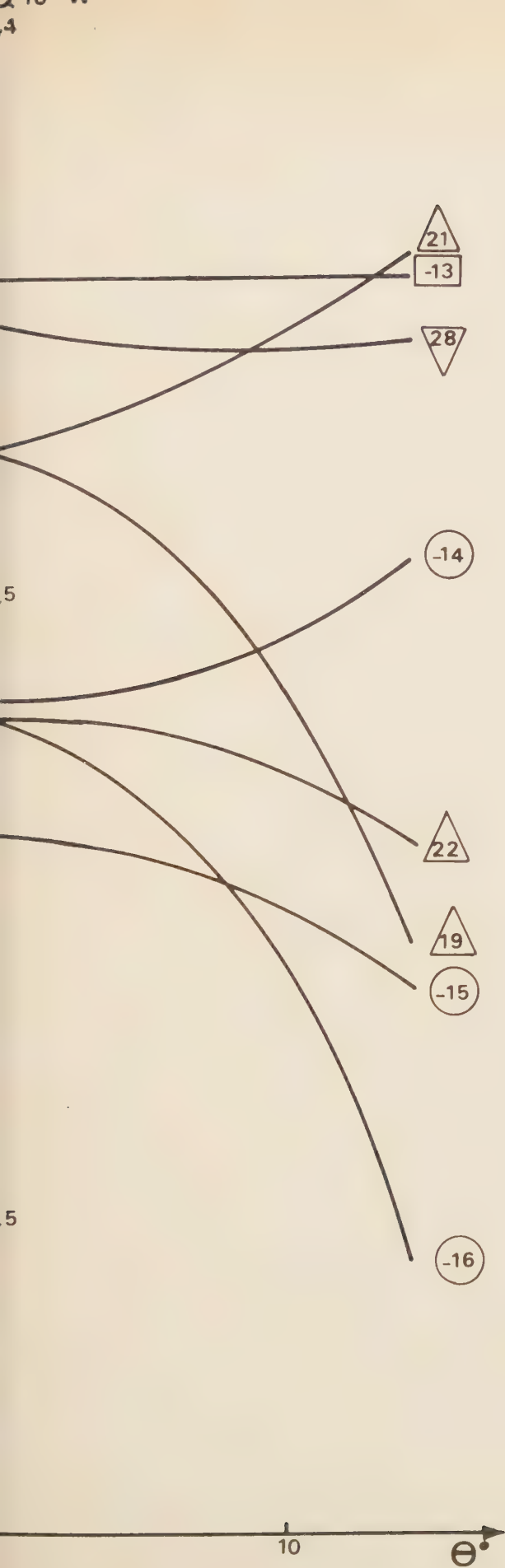


FIGURE 29

il n'a pas été possible d'étudier plus de quatre cas de cellule.

On peut remarquer que :

1°) les valeurs relatives aux têtes des lingots (surfaces 13,18,23,28) sont pratiquement constantes. Ceci montre que, en ce qui concerne la surface supérieure, le flux rayonné global est indépendant de la position du lingot.

2°) En valeur absolue, les courbes 15 et 22 décroissent de manière sensible et semblent avoir des pentes voisines.

3°) De la même manière, les courbes 14 et 22 croissent en valeur absolue avec des pentes dont les valeurs sont opposées aux courbes précédentes.

4°) Les valeurs relatives aux surfaces 16 et 19 décroissent en valeur absolue de manière assez importante.

5°) Dans le cas des faces 17 et 20 les valeurs absolues des flux nets sont égales pour un angle de 11 degrés. L'une des courbes croît et l'autre décroît.

6°) En ce qui concerne les faces 10 et 27, la valeur absolue des pentes des courbes est positive et voisine.

7°) Pour les autres surfaces, on remarque des variations plus faibles des énergies reçues ou émises par rayonnement.

De manière plus générale le tableau ci-dessous,

θ	Cellule haute $\theta = 0^\circ$	Cellule basse $\theta = 0^\circ$	Cellule basse $\theta = 7^\circ$	Cellule basse $\theta = 11^\circ$
Lingot 1	- 92 390	- 91 990	- 92 090	- 92 350
Lingot 2	- 25 880	- 25 860	- 25 890	- 25 910
Lingot 3	27 640	27 510	27 650	27 770
Lingot 4	90 410	90 100	90 340	90 360

Résultats donnés en Watts

donnant les énergies globales reçues ou émises par chaque lingot en régime permanent, permet de constater que dans le cas d'une cellule Pit avec un gradient de température relativement faible, les énergies rayonnées relatives à chaque lingot sont indépendantes du positionnement de ceux-ci.

De plus, il semble que l'influence d'une rehausse de 40 centimètres de la cellule, soit négligeable sur l'échange par rayonnement.

Enfin, dans les conditions citées ci-dessus, la température des parois réfractaires semble indépendante de la position des lingots ainsi que de la profondeur de la cellule.

Par contre, il n'est pas possible d'énoncer des conclusions analogues en ce qui concerne une cellule Pit ayant un fort gradient de température.

C O N C L U S I O N

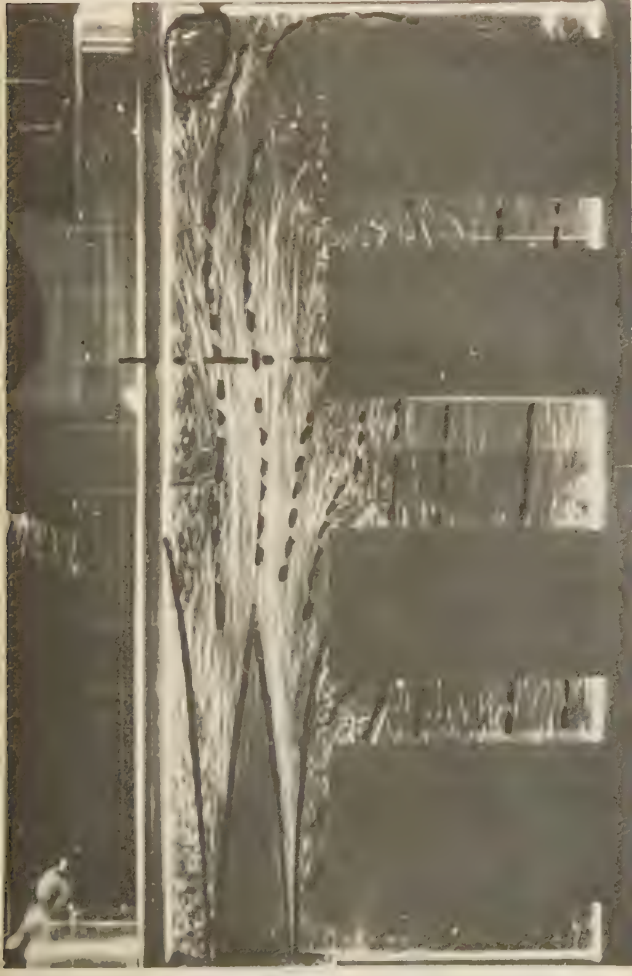
On peut constater tout d'abord, qu'une étude analogique basée sur la conservation du nombre de Reynolds au carneau, et du rapport des impulsions au brûleur et au carneau, permet une détermination relativement précise du développement de la flamme et de l'écoulement des fumées dans une cellule Pit.

On remarque (chapitre I) que la dimension et le positionnement des lingots, ainsi que l'introduction des déflecteurs, jouent un rôle important quant aux masques entre lingots. D'autre part, les paramètres longueur des contacts flamme-voûte et flamme-lingots, ainsi que la taille des tourbillons, varient notablement en fonction de la géométrie de la cellule et du type de lingot utilisé.

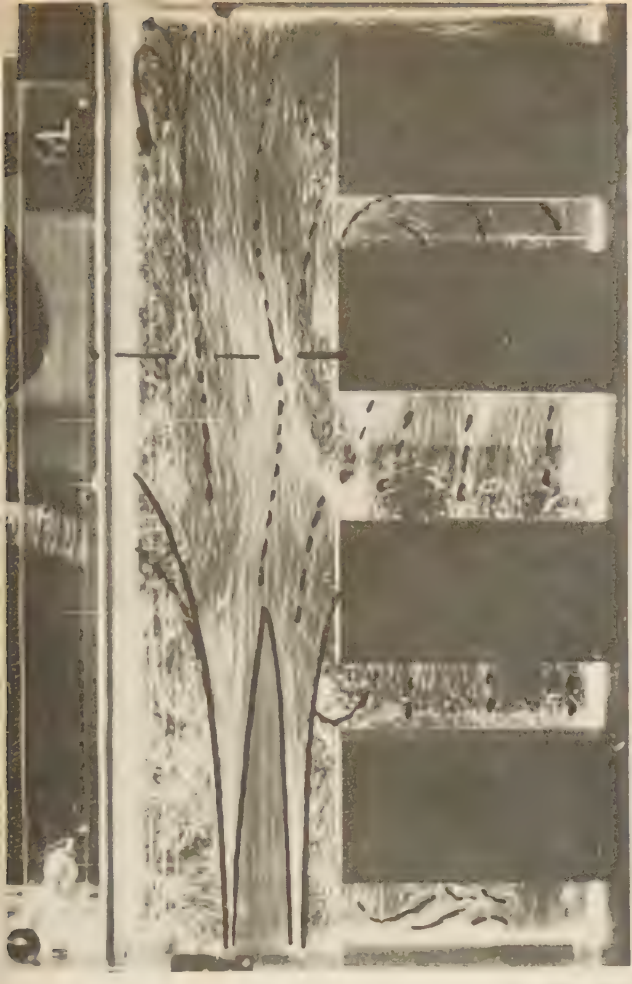
Dans la deuxième partie, les phénomènes dûs au rayonnement sont examinés. On constate que les formules de détermination des facteurs géométriques, peuvent être considérablement simplifiées, et que le calcul en devient possible pour un certain nombre de cas relativement complexes (Annexe II). Dans le cas d'un four Pit, on peut déterminer à l'aide de cette formulation, (appliquée au calcul sur ordinateur), l'évolution des facteurs géométriques, en fonction de l'angle d'inclinaison des lingots par rapport au plan de symétrie longitudinal du four.

Enfin, la troisième partie donne un aperçu des possibilités offertes par la détermination des facteurs géométriques. En effet, une étude complète du rayonnement entre les différentes parois constitutives du four, et de son chargement peut être réalisée. Nous avons pu étudier les variations des énergies émises ou reçues par les différentes faces des lingots en fonction de l'angle d'inclinaison de ceux-ci.

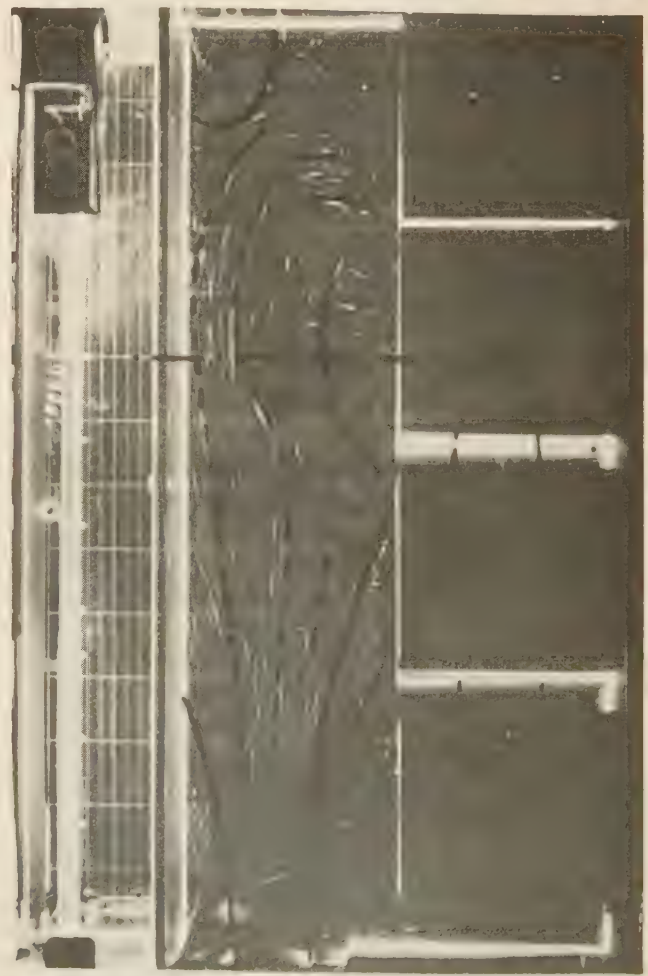
Enfin, le flux calorifique global relatif à n'importe quel lingot, ainsi que la température des parois réfractaires sont indépendants de l'angle d'inclinaison des lingots par rapport au plan de symétrie longitudinal de la cellule.



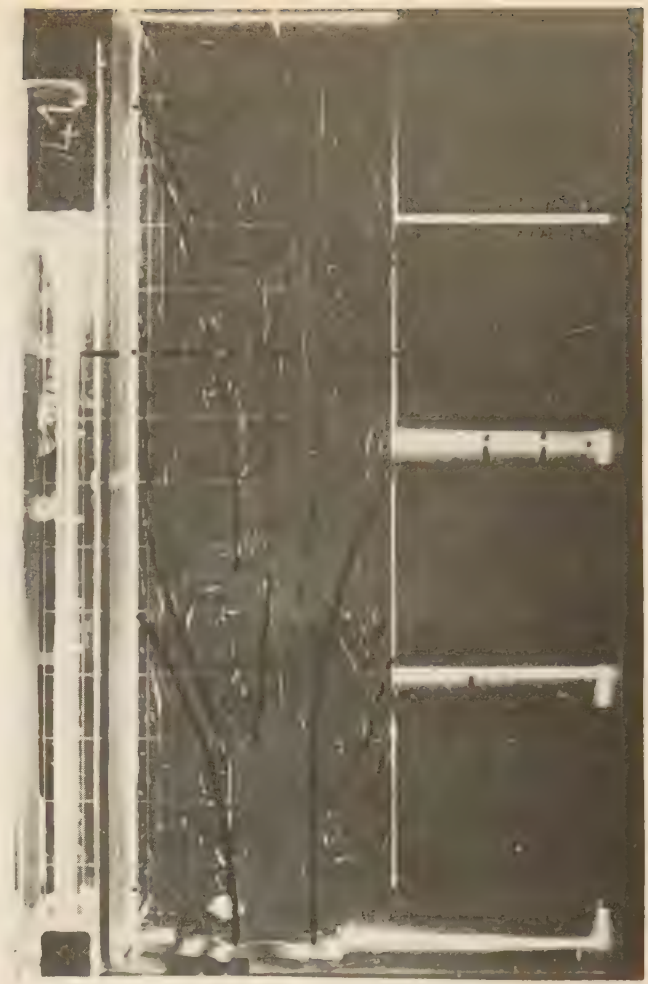
CELLULE BASSE.CHARGE N° 1



CELLULE HAUTE.CHARGE N° 1



CELLULE BASSE.CHARGE N° 2



CELLULE HAUTE.CHARGE N° 2



CELLULE BASSE.CHARGE N° 1



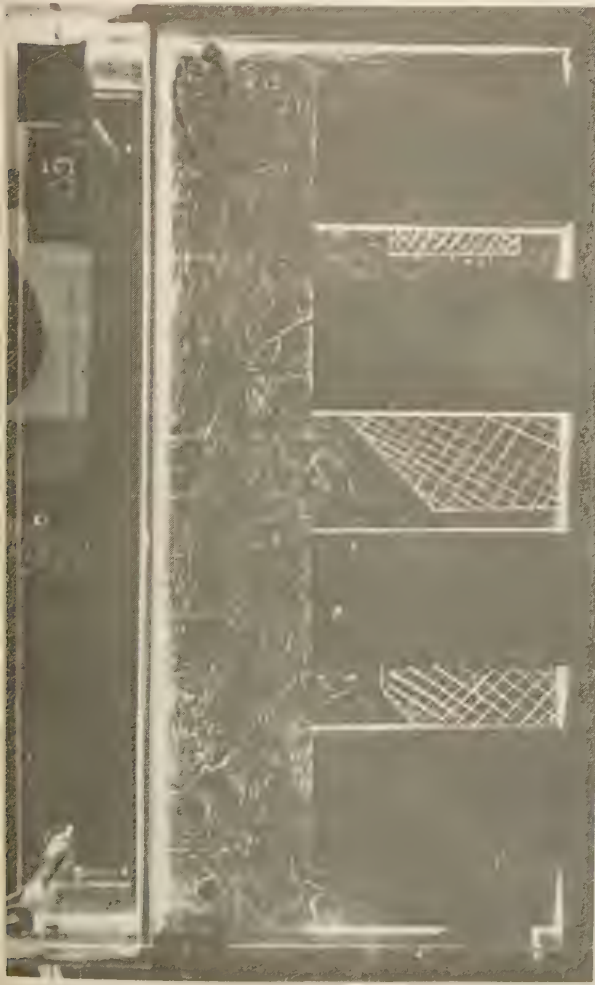
CELLULE HAUTE.CHARGE N° 1



CELLULE BASSE.CHARGE N° 2



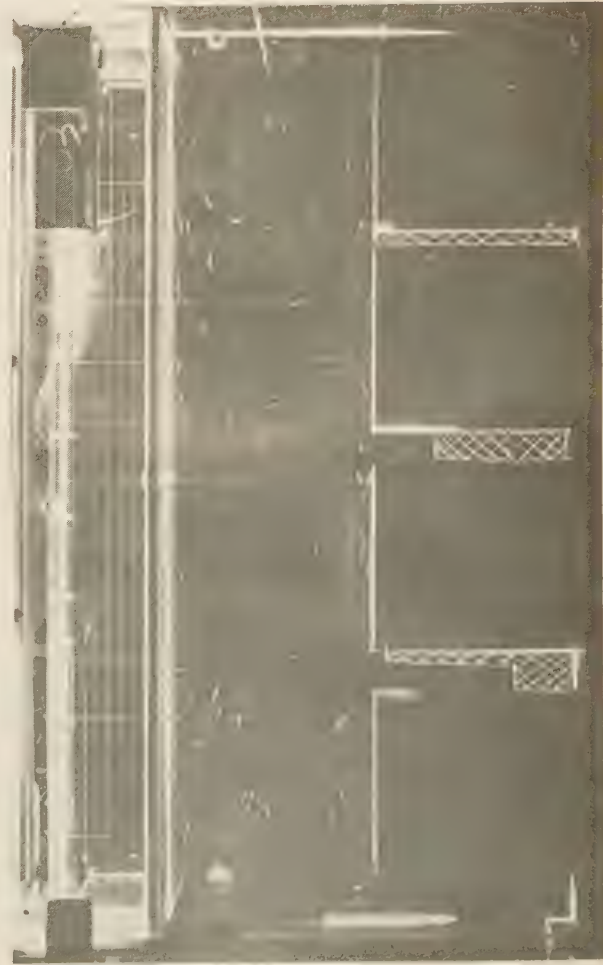
CELLULE HAUTE.CHARGE N° 2



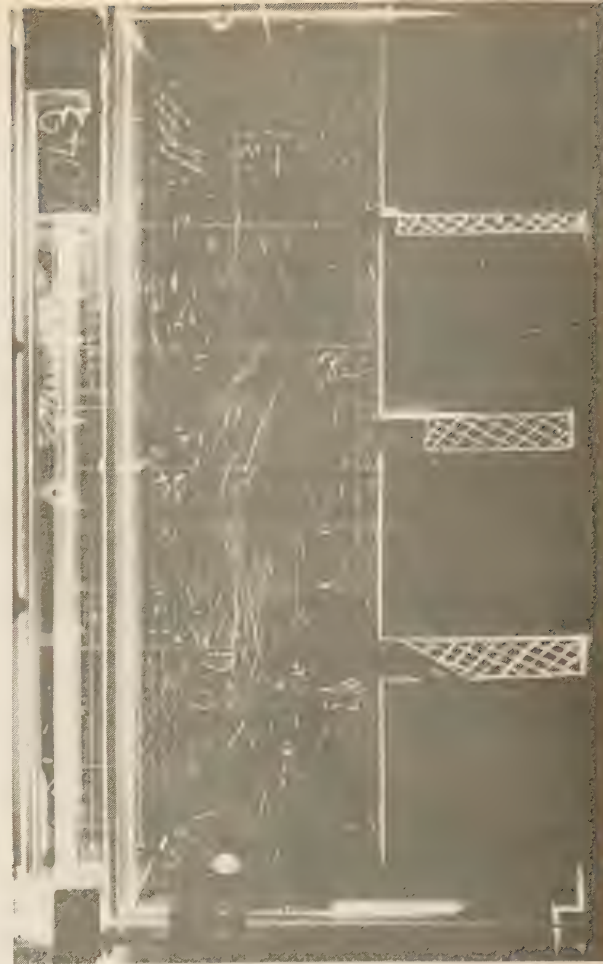
CELLULE BASSE.CHARGE N° 1



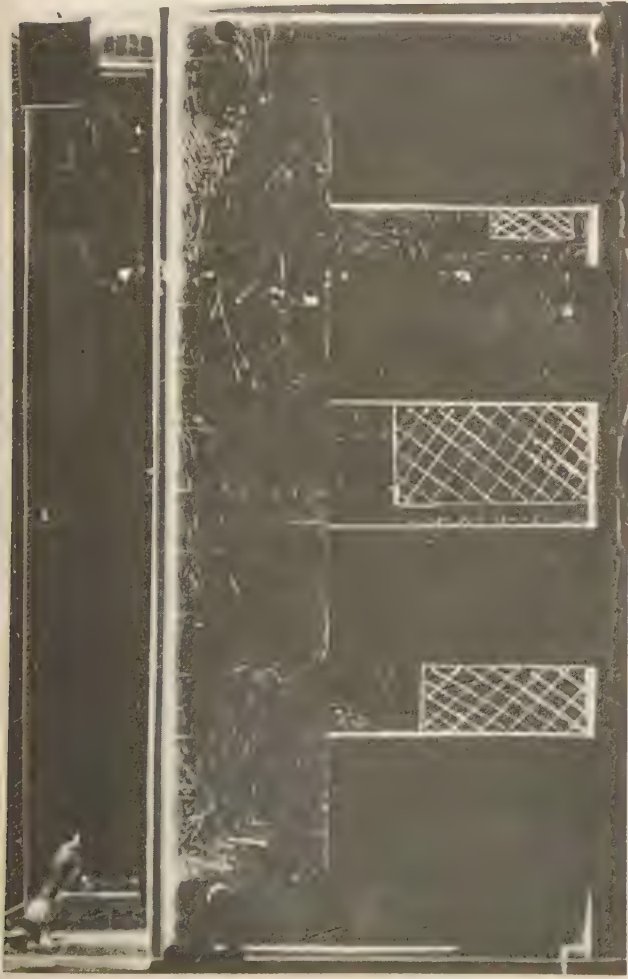
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 1



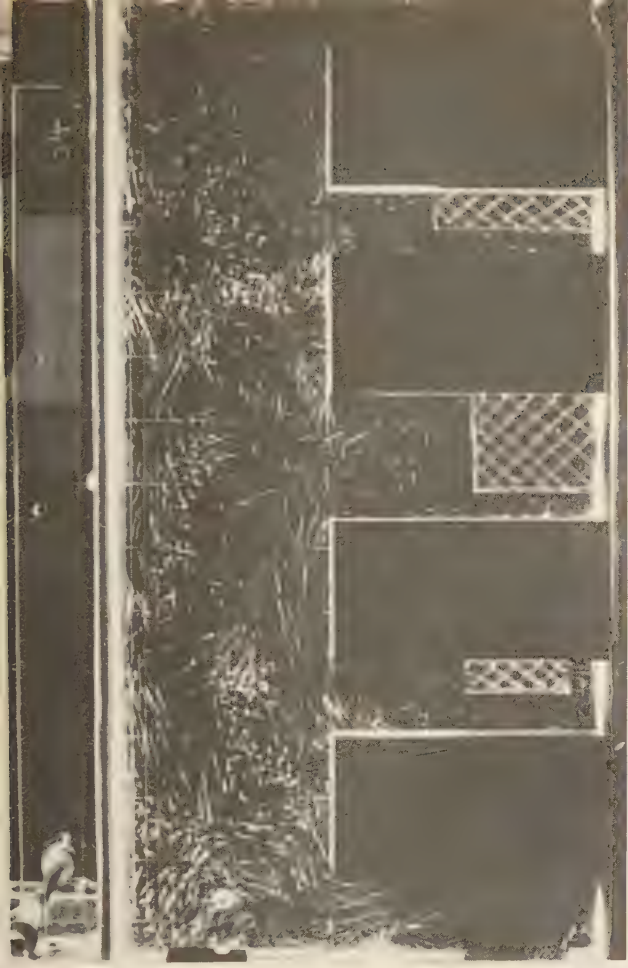
CELLULE BASSE.CHARGE N° 2



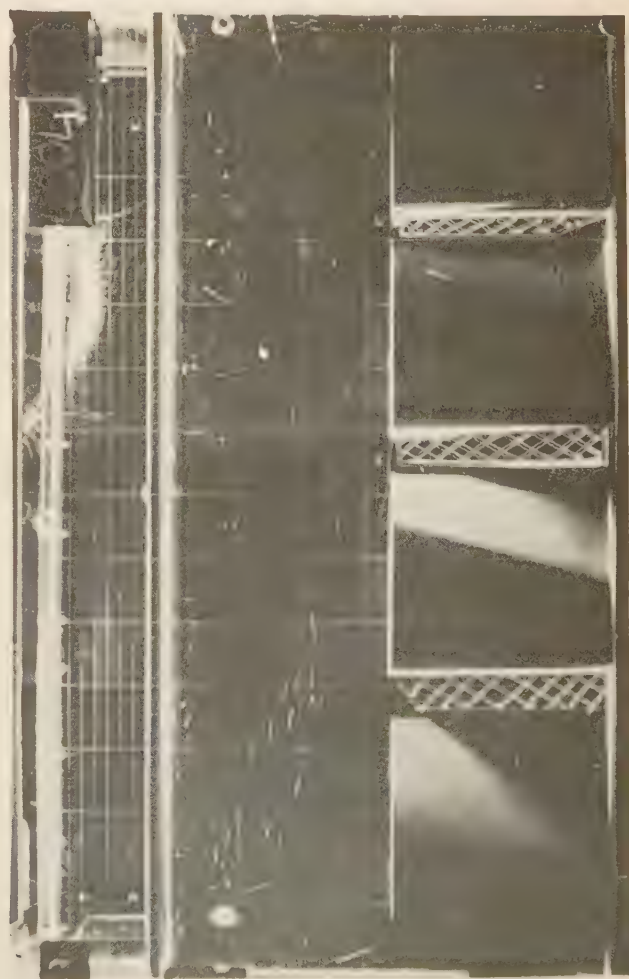
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 2



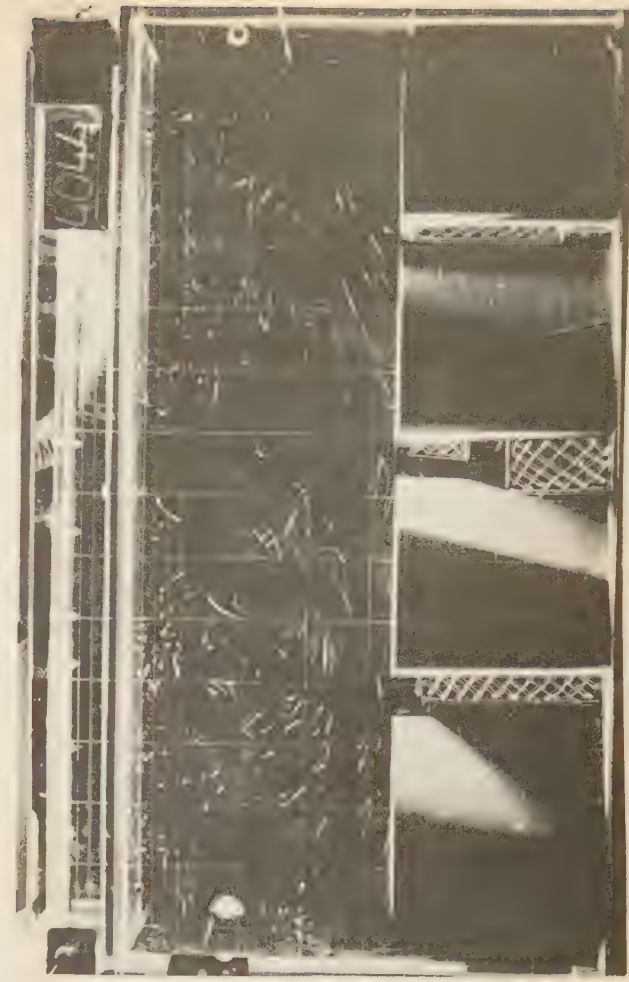
CELLULE BASSE .CHARGE N° 1



CELLULE .HAUTE CHARGE N° 1



CELLULE BASSE .CHARGE N° 2

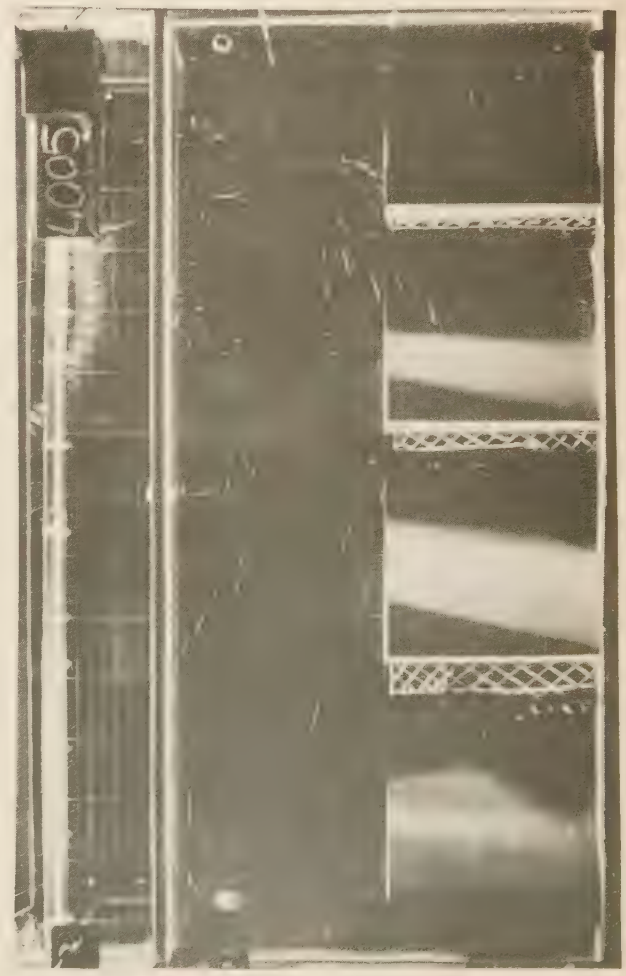


CELLULE HAUTE .CHARGE N° 2



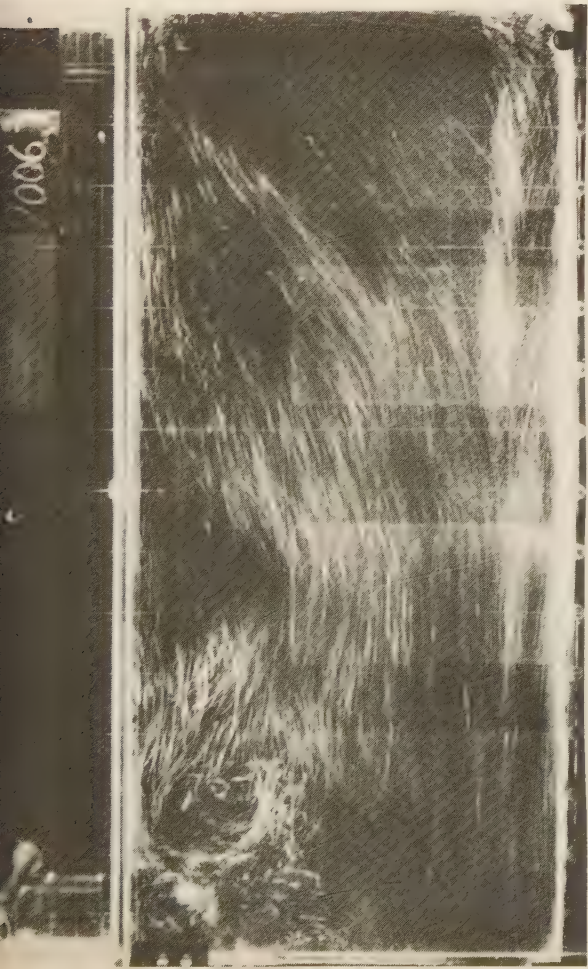
CELLULE BASSE .CHARGE N° 1

CELLULE HAUTE .CHARGE N° 1



CELLULE BASSE .CHARGE N° 2

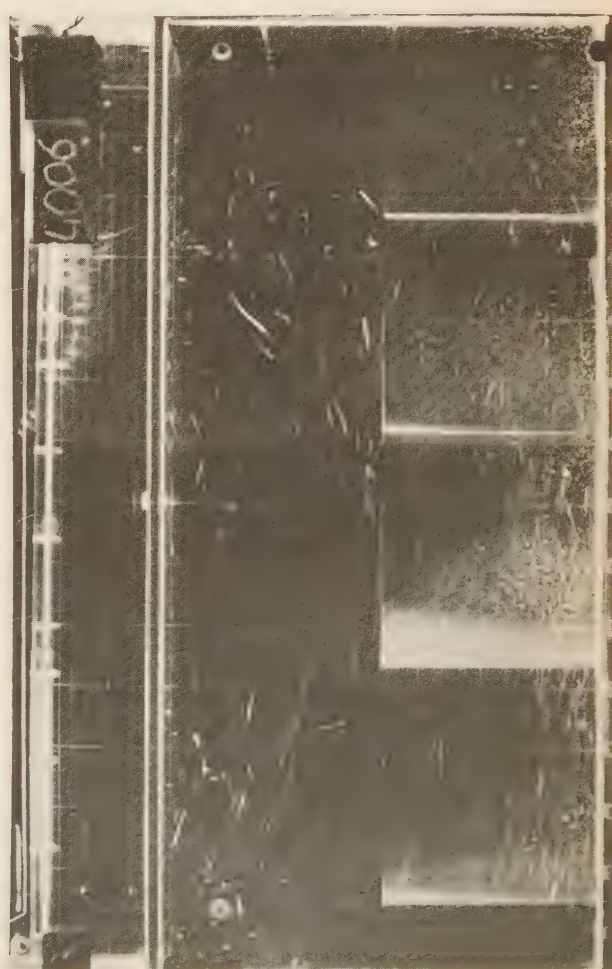
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 2



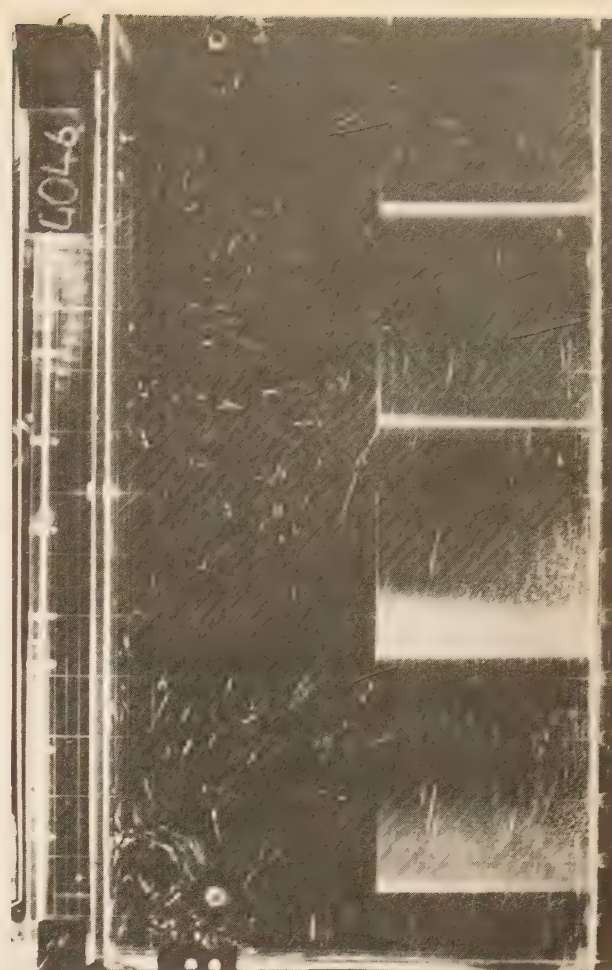
CELLULE BASSE .CHARGE N° 1



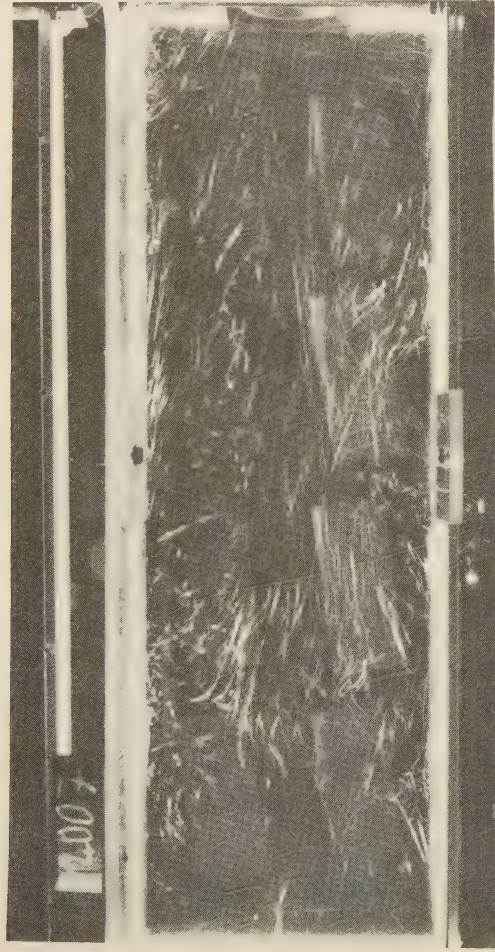
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 1



CELLULE BASSE .CHARGE N° 2



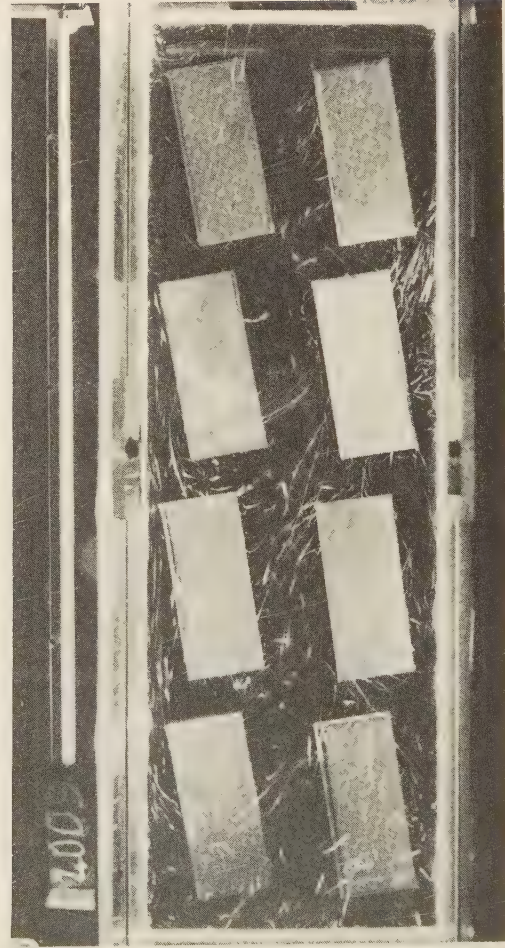
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 2



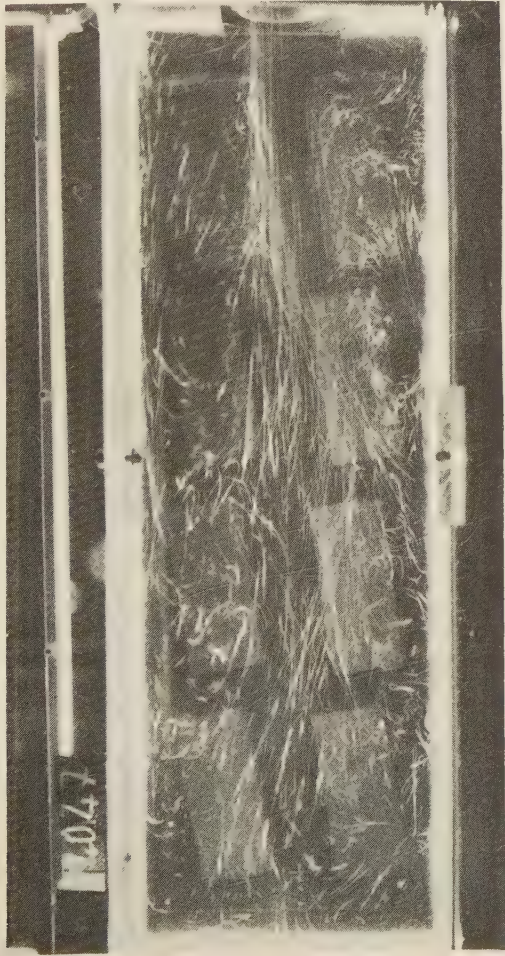
AXE DU BRULEUR



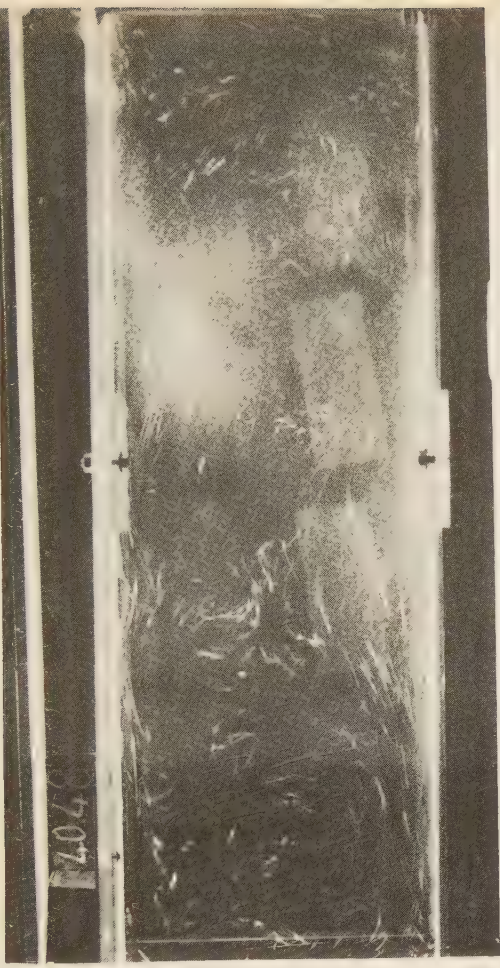
VOUTE



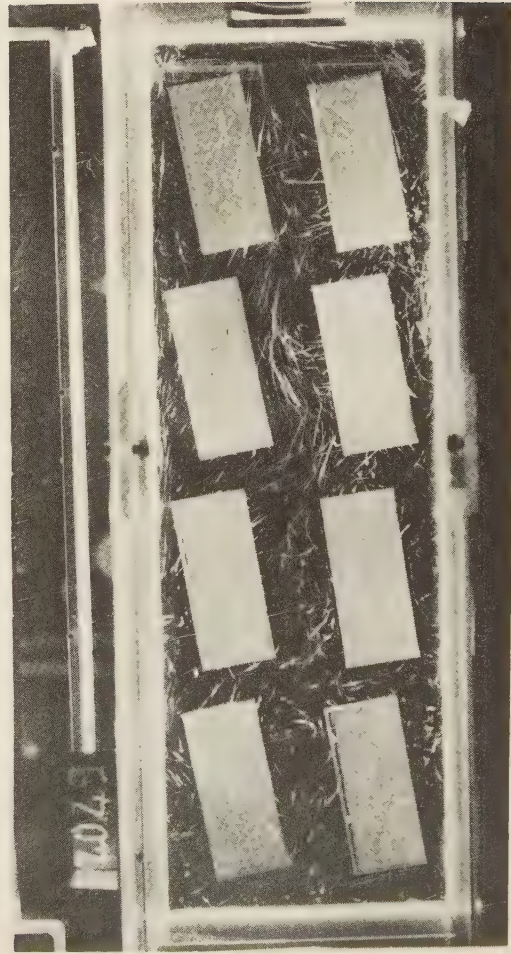
TETES DES LINGOTS



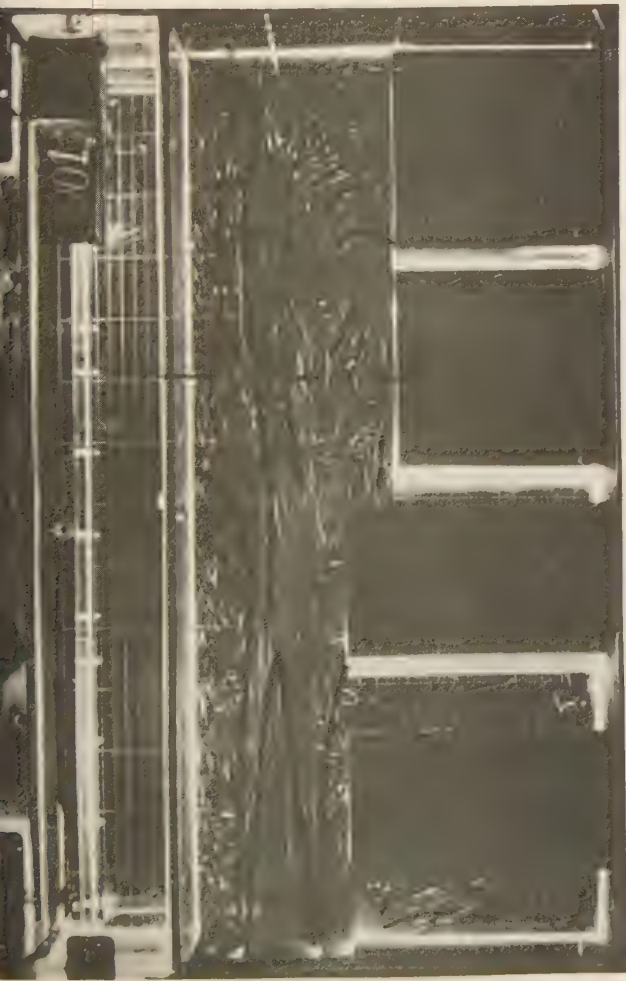
AXE DU BRULEUR



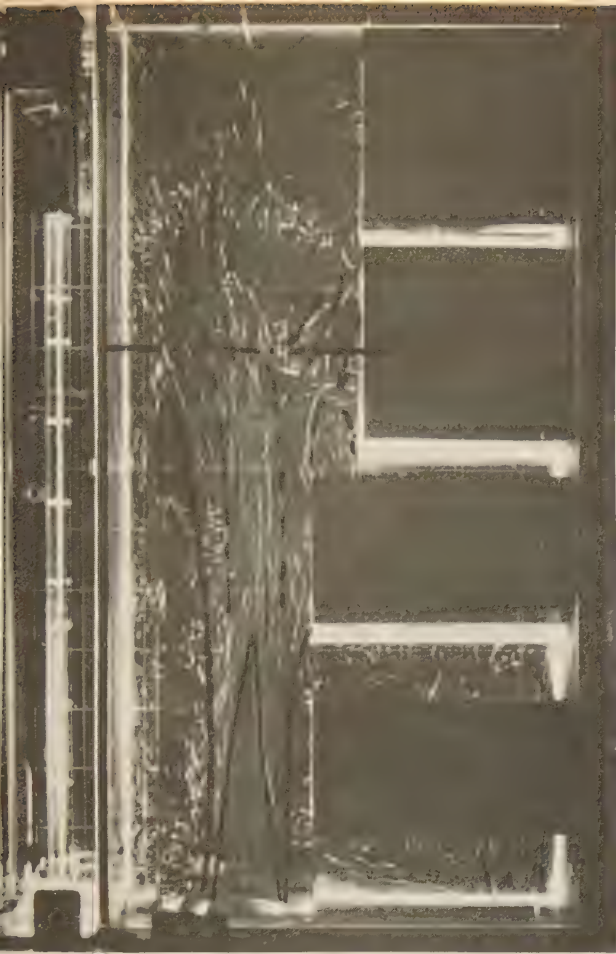
VOUTE



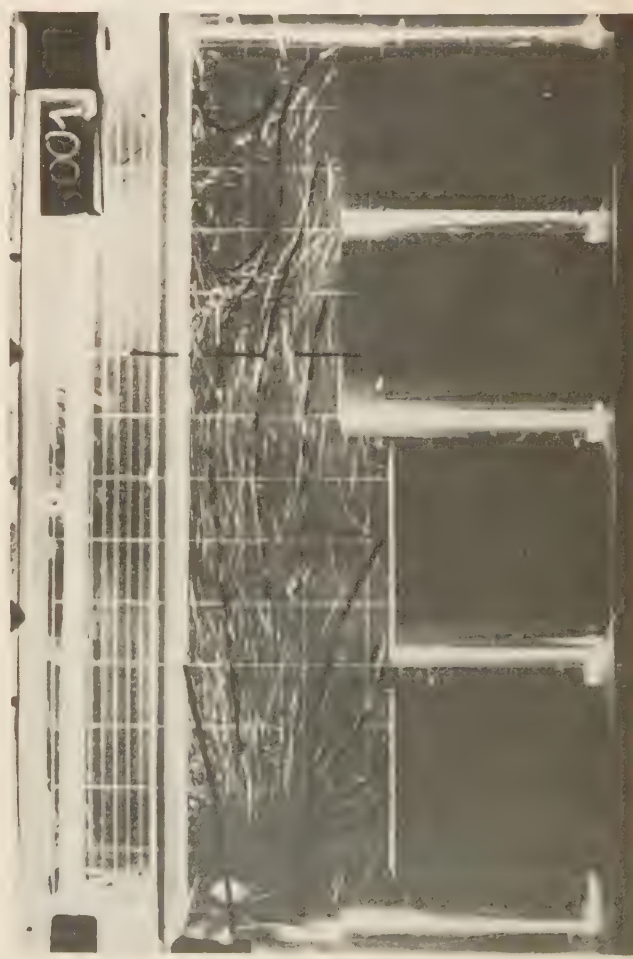
TETES DES LINGOTS



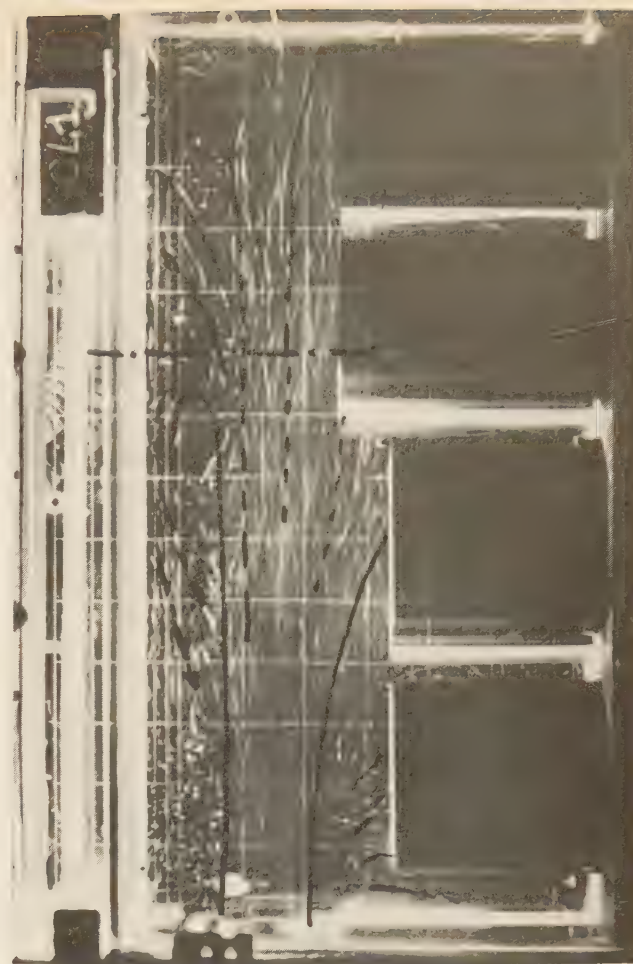
CELLULE BASSE .CHARGE N° 3



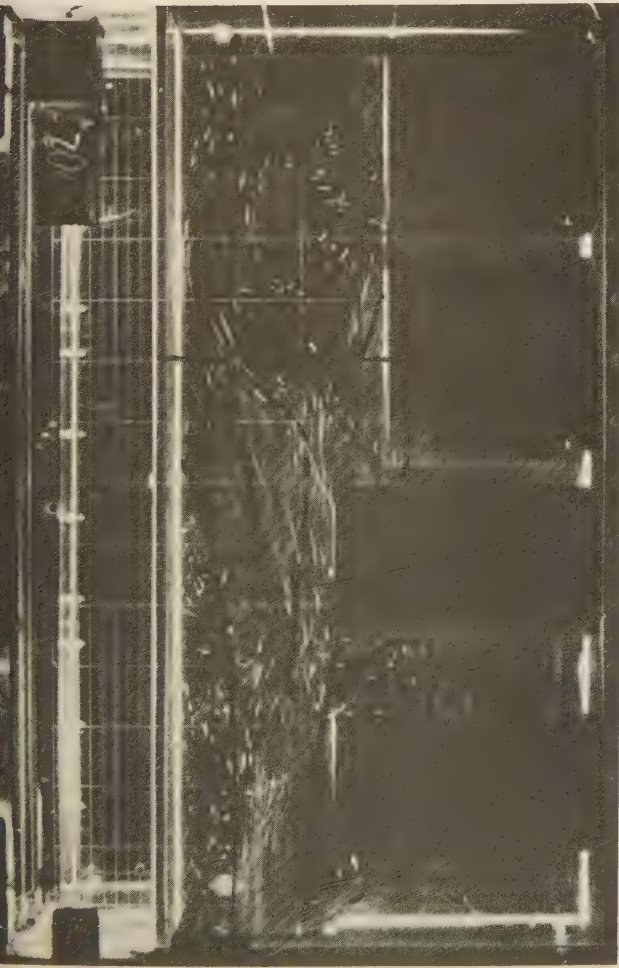
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 3



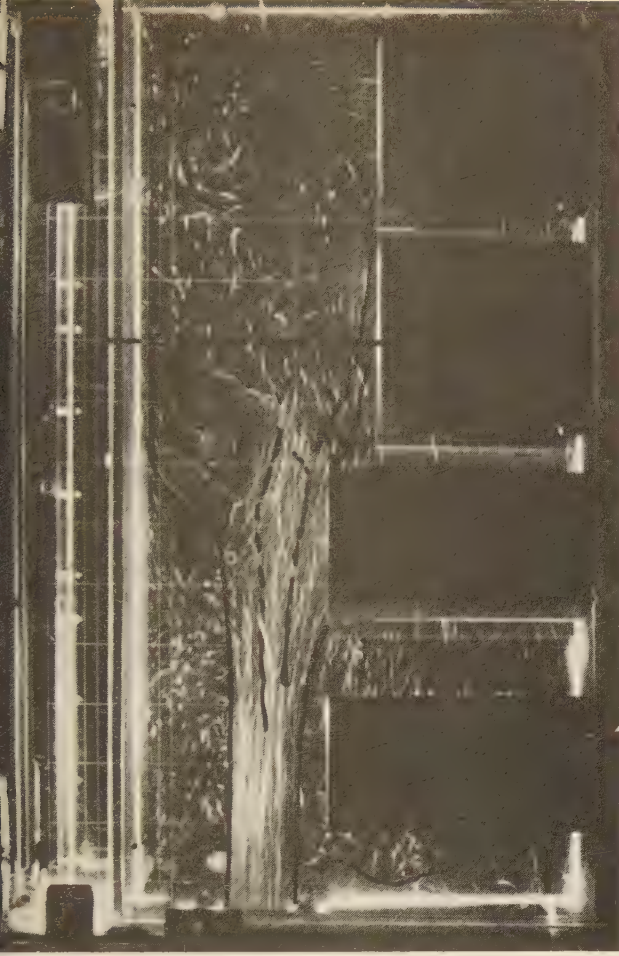
CELLULE BASSE .CHARGE N° 4



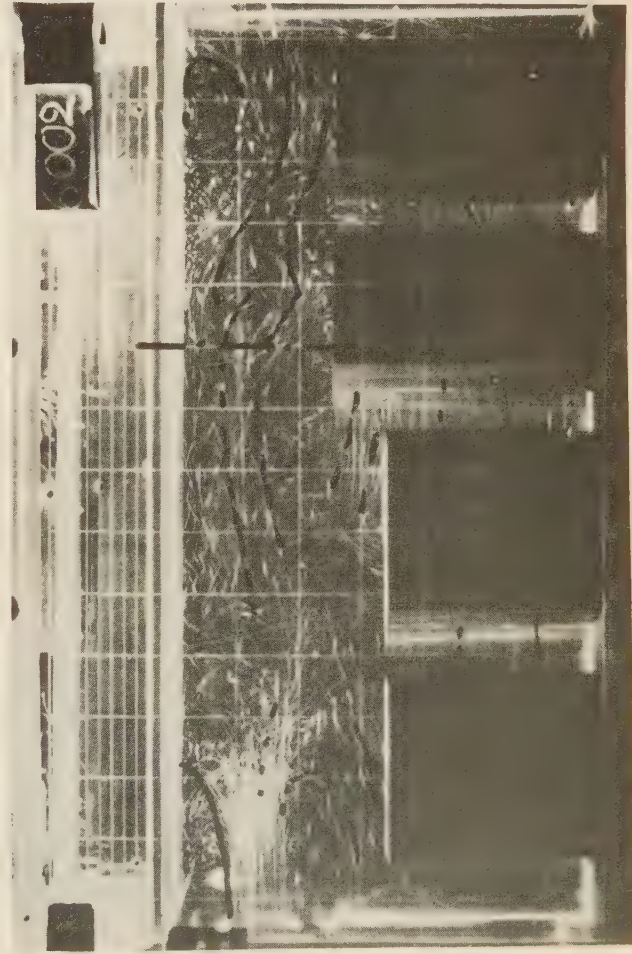
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 4



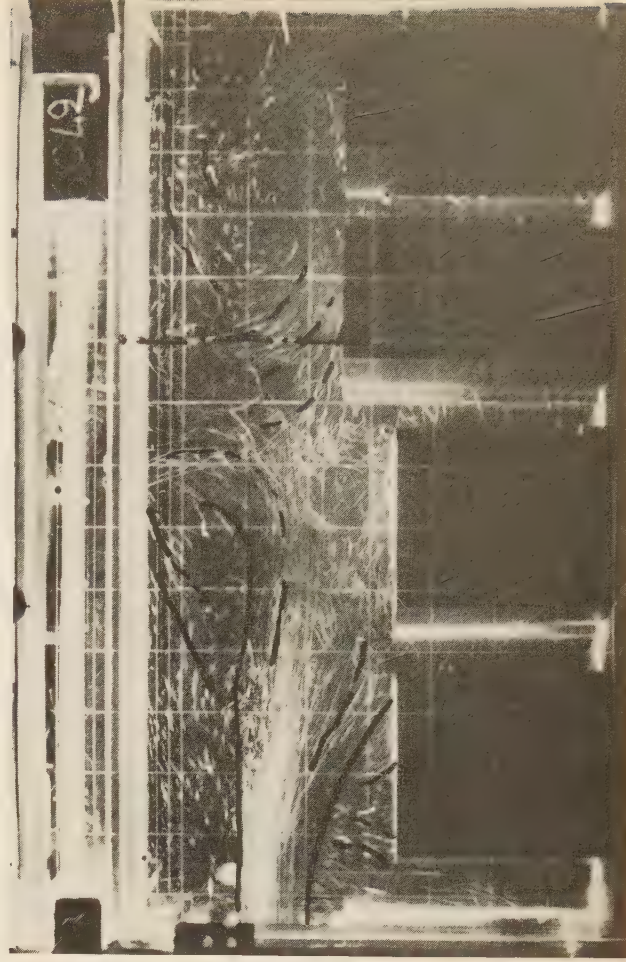
CELLULE BASSE.CHARGE N° 3



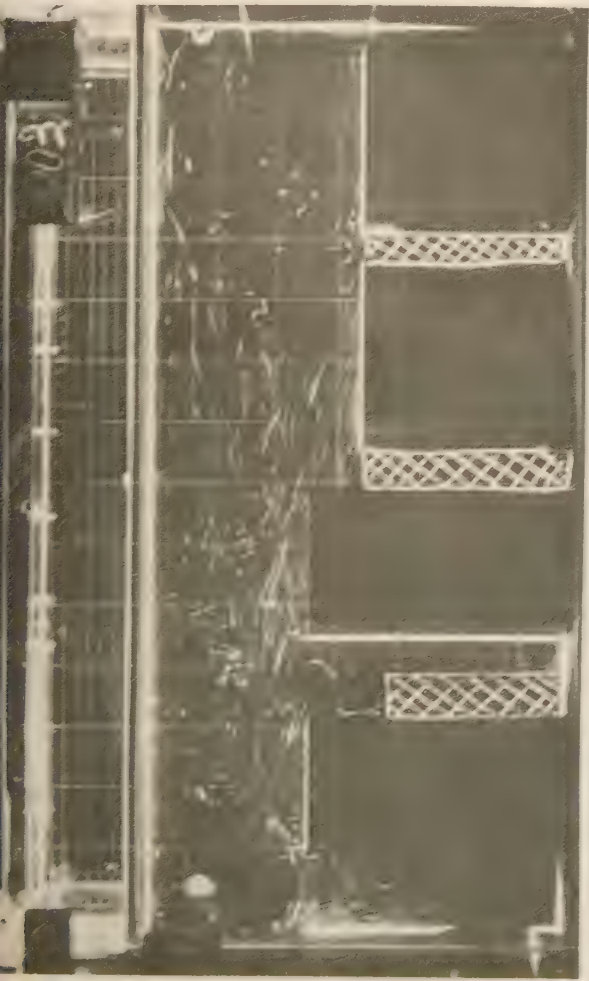
CELLULE HAUTE.CHARGE N° 3



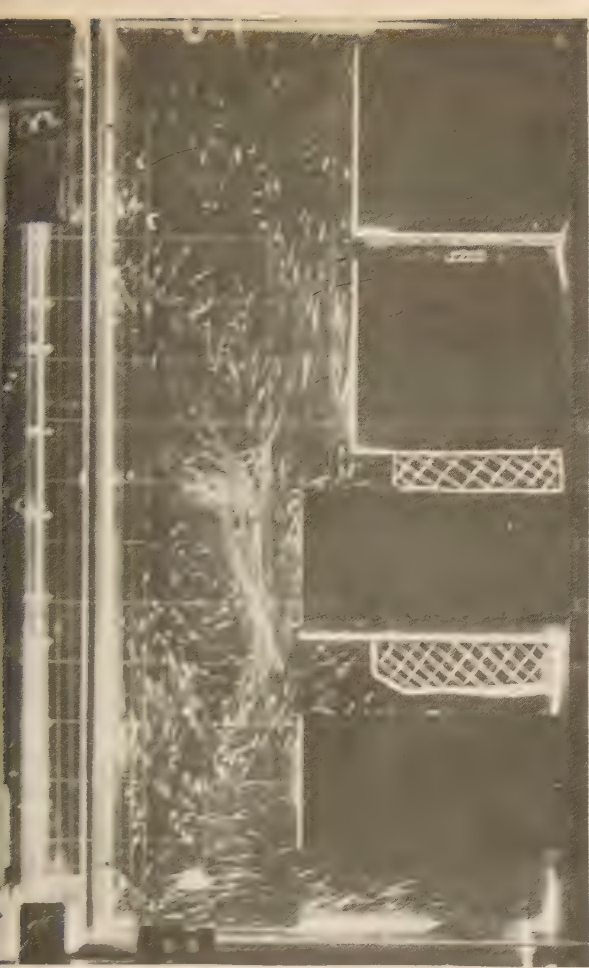
CELLULE BASSE.CHARGE N° 4



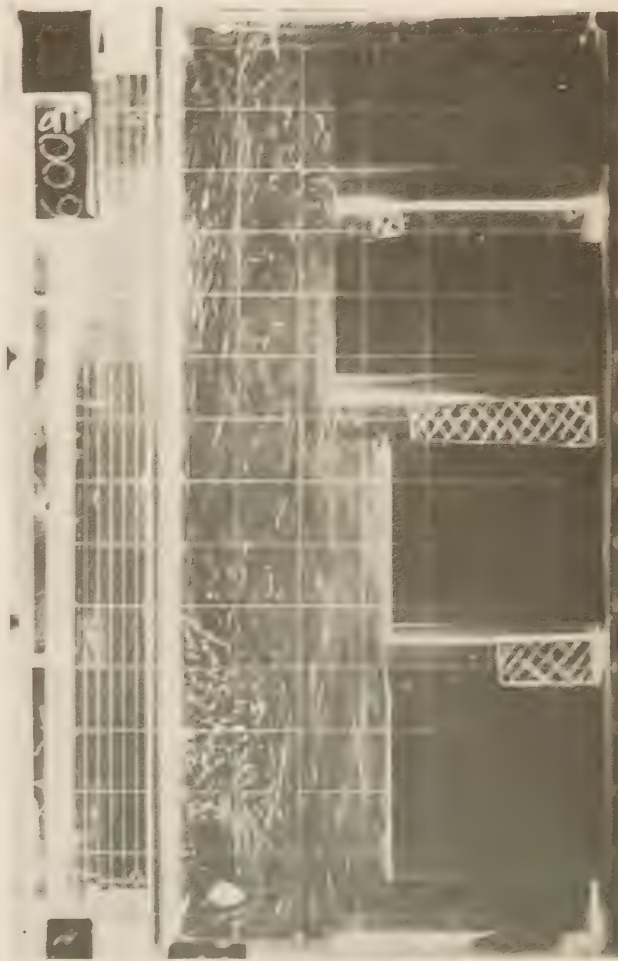
CELLULE HAUTE.CHARGE N° 4



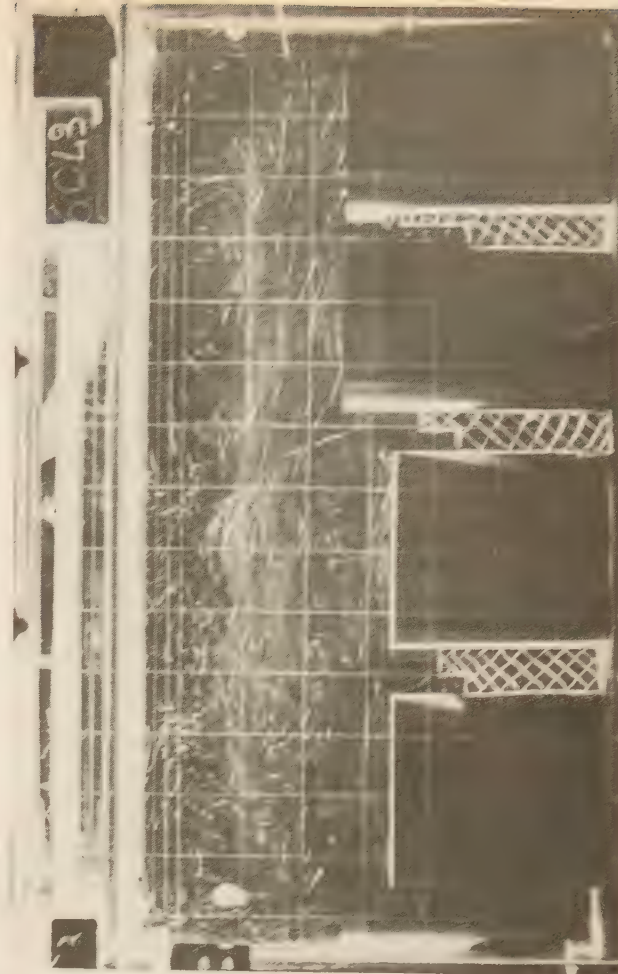
CELLULE BASSE . CHARGE N° 3



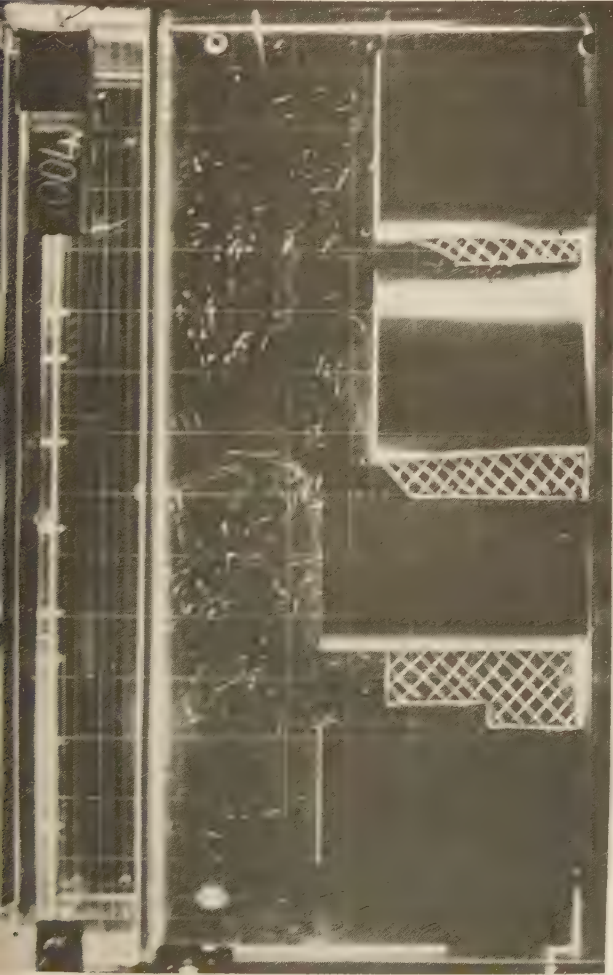
CELLULE HAUTE . CHARGE N° 3



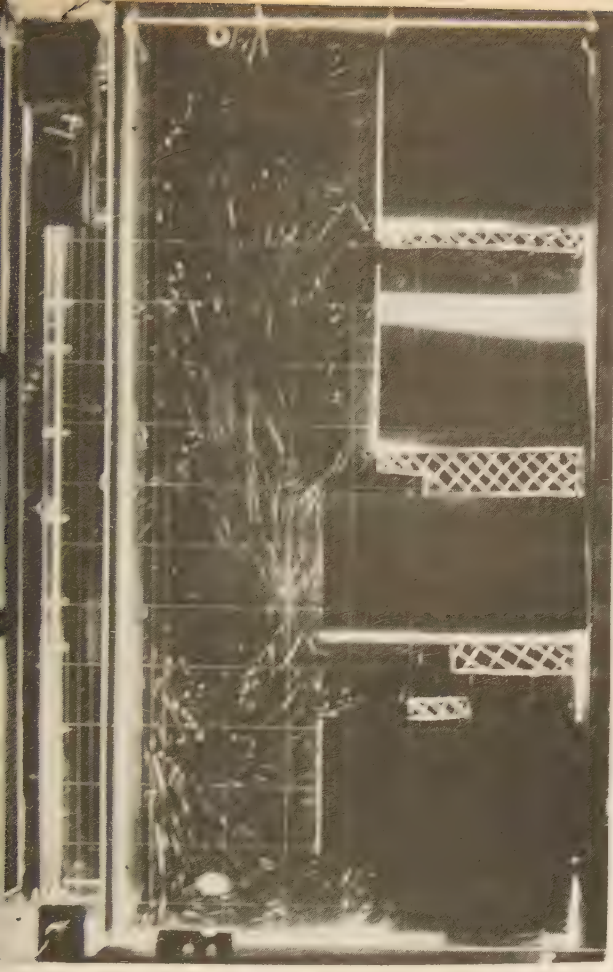
CELLULE BASSE . CHARGE N° 4



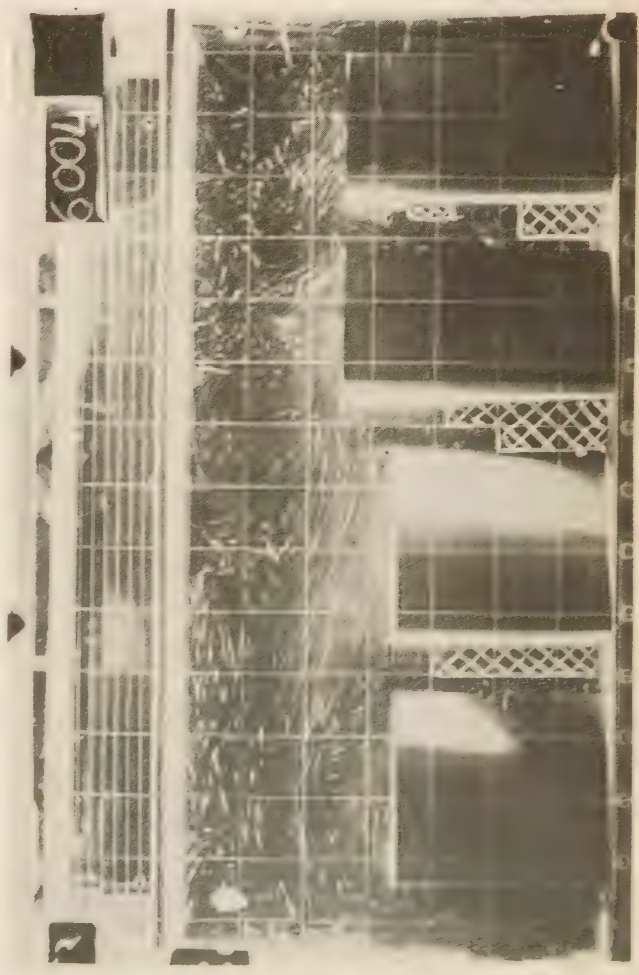
CELLULE HAUTE . CHARGE N° 4



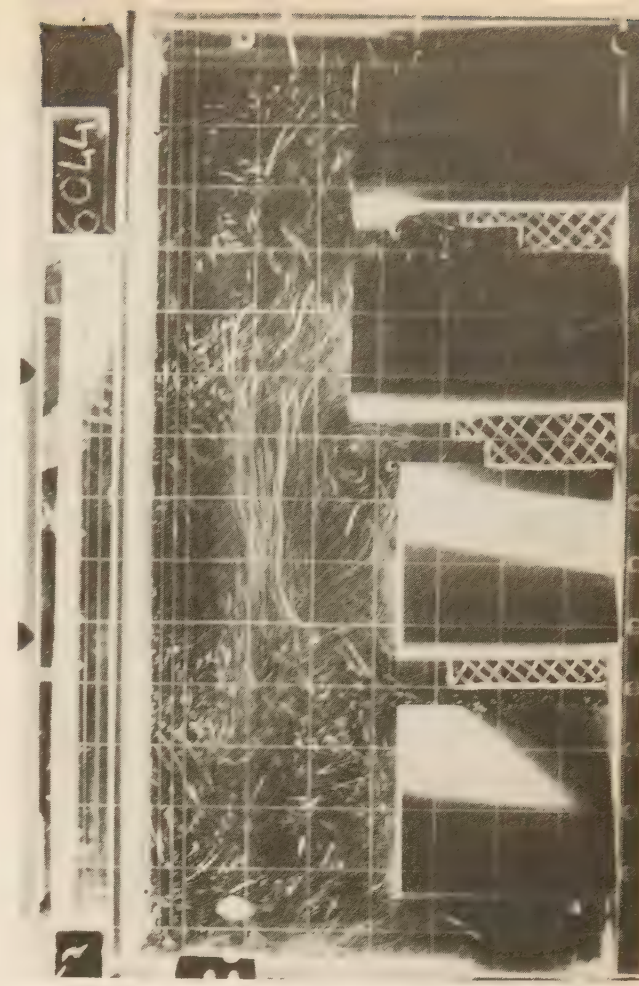
CELLULE BASSE .CHARGE N° 3



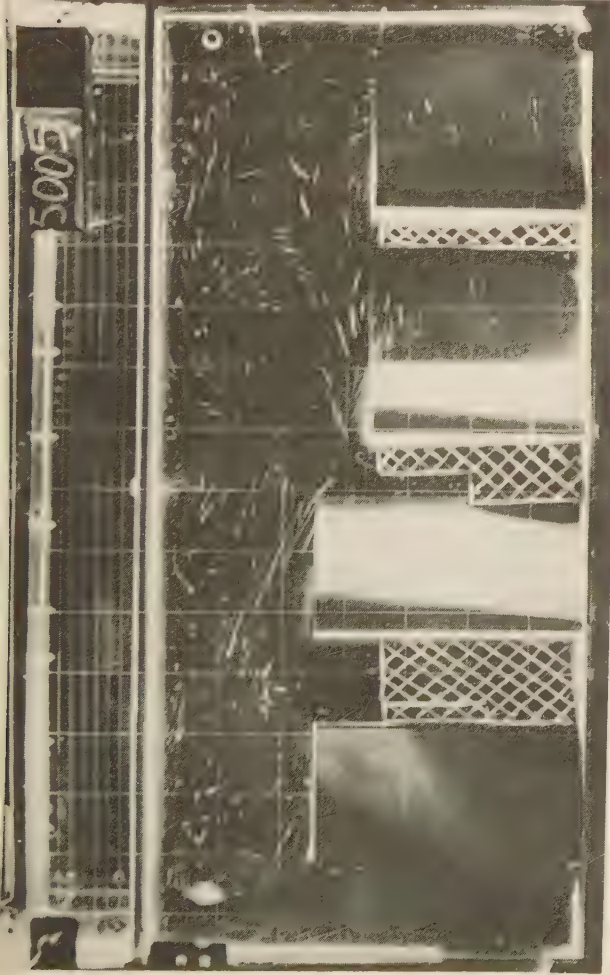
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 3



CELLULE BASSE .CHARGE N° 4



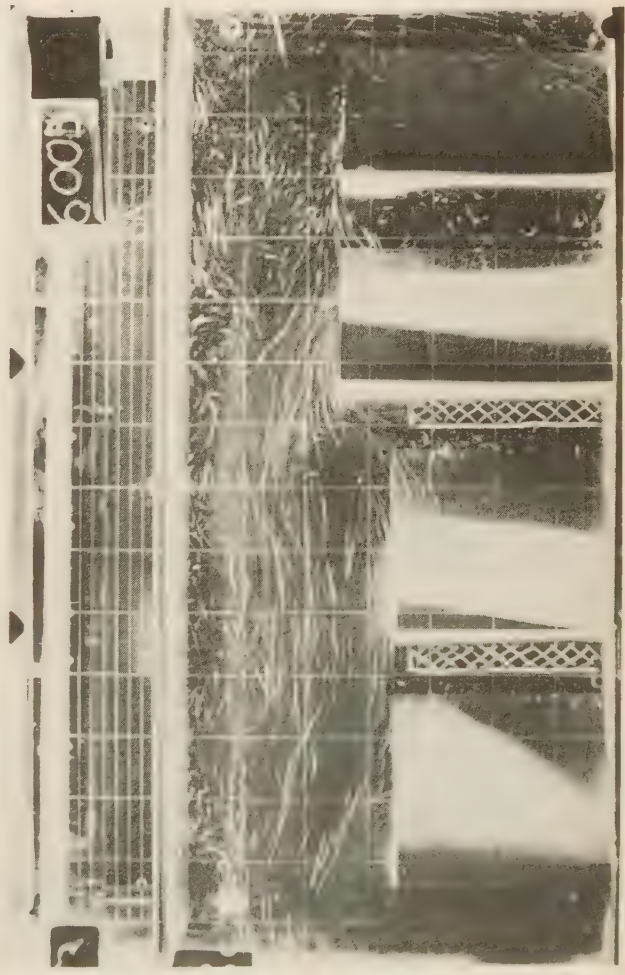
CELLULE HAUTE .CHARGE N° 4



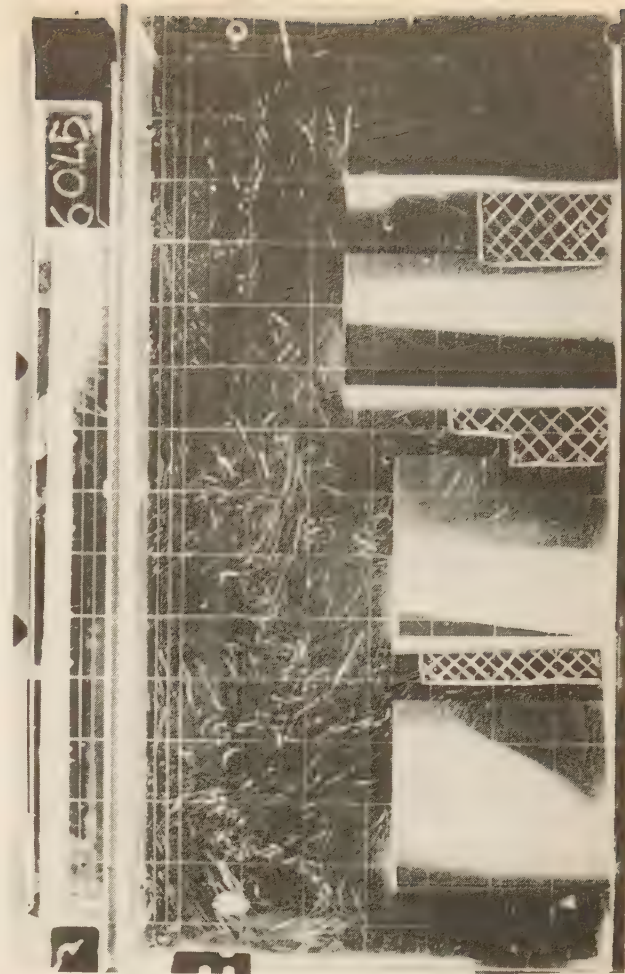
CELLULE BASSE-CHARGE N° 3



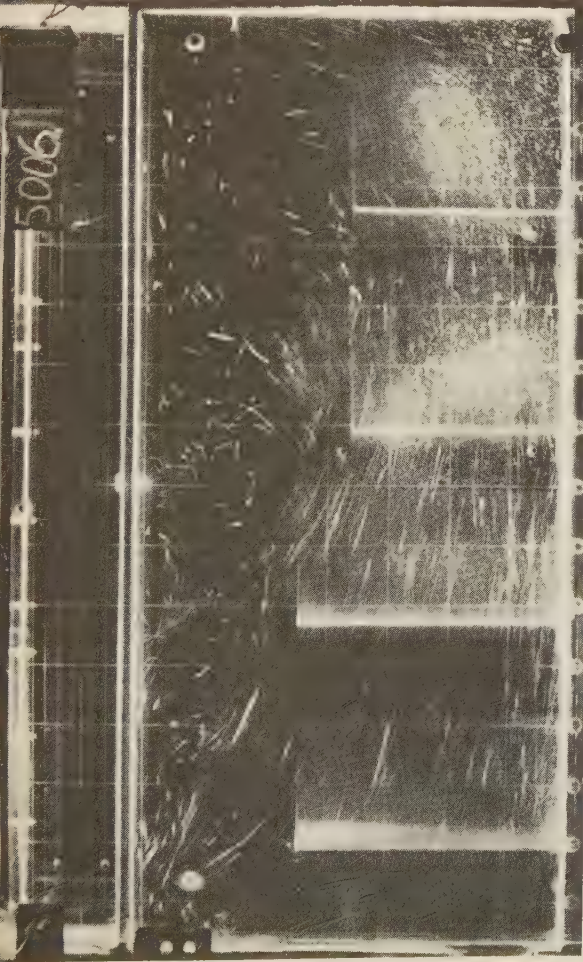
CELLULE HAUTE-CHARGE N° 3



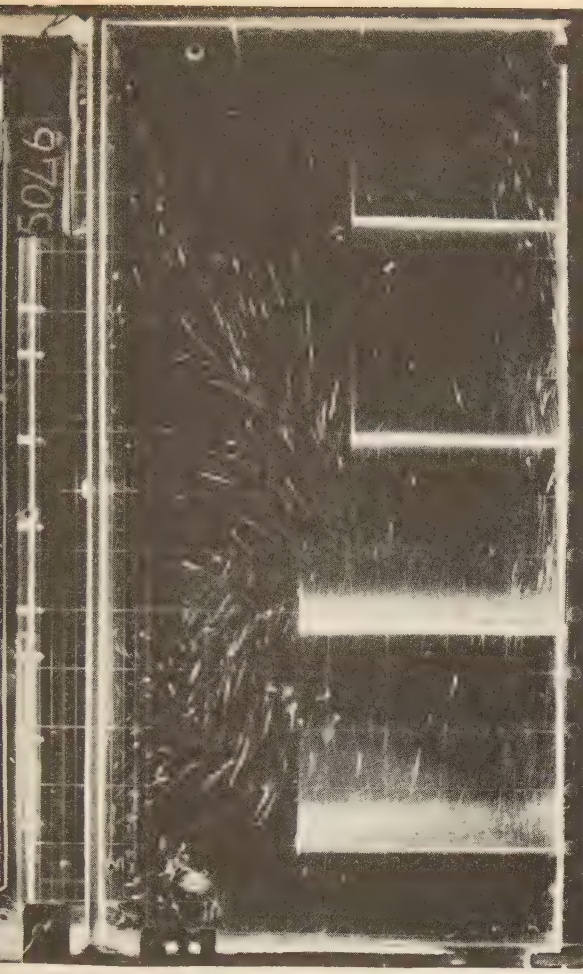
CELLULE BASSE-CHARGE N° 4



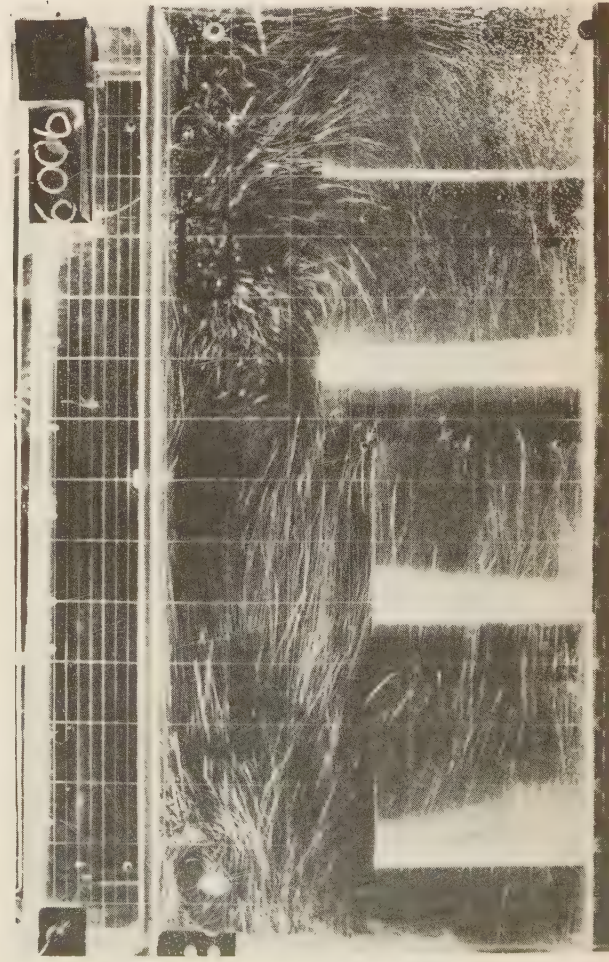
CELLULE HAUTE-CHARGE N° 4



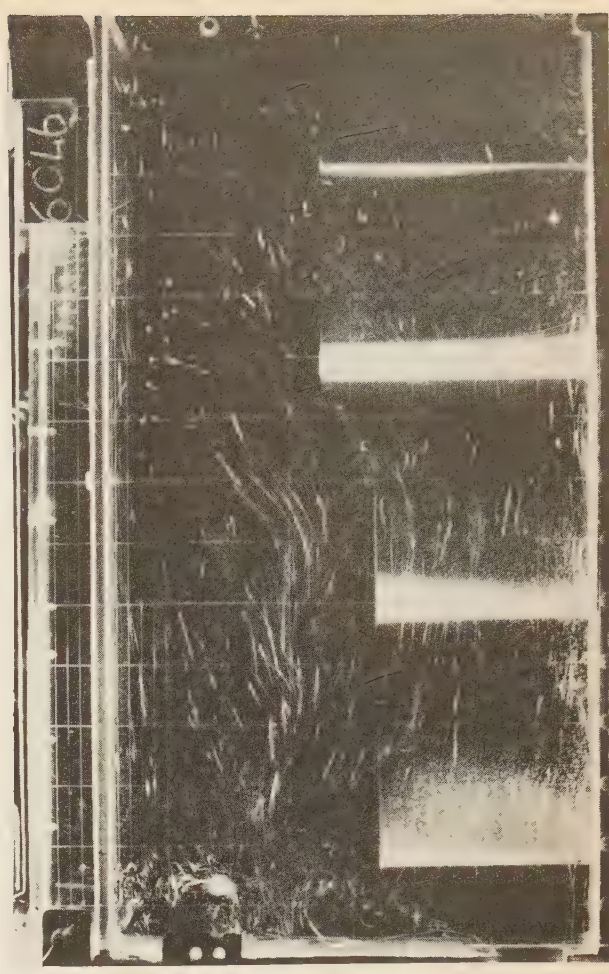
CELLULE BASSE.CHARGE N° 3



CELLULE HAUTE.CHARGE N° 3



CELLULE BASSE.CHARGE N° 4



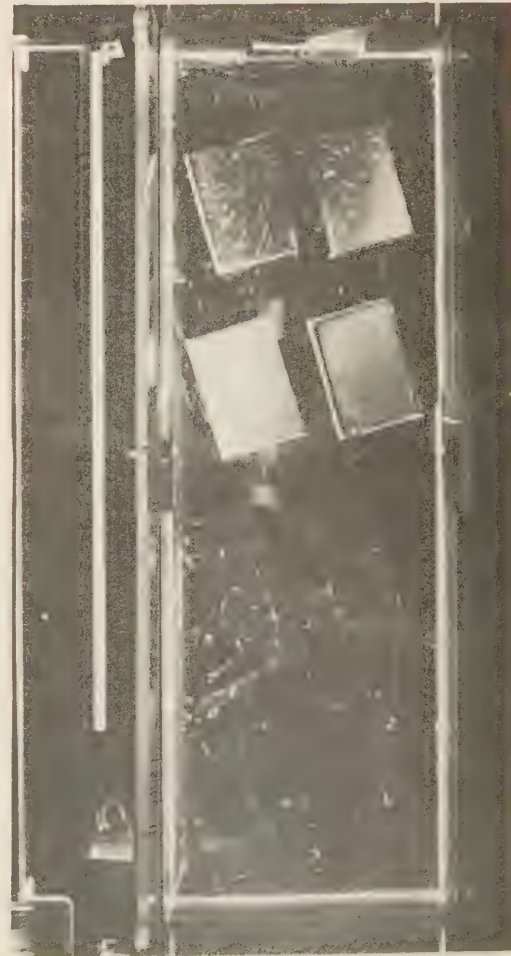
CELLULE HAUTE.CHARGE.N° 4



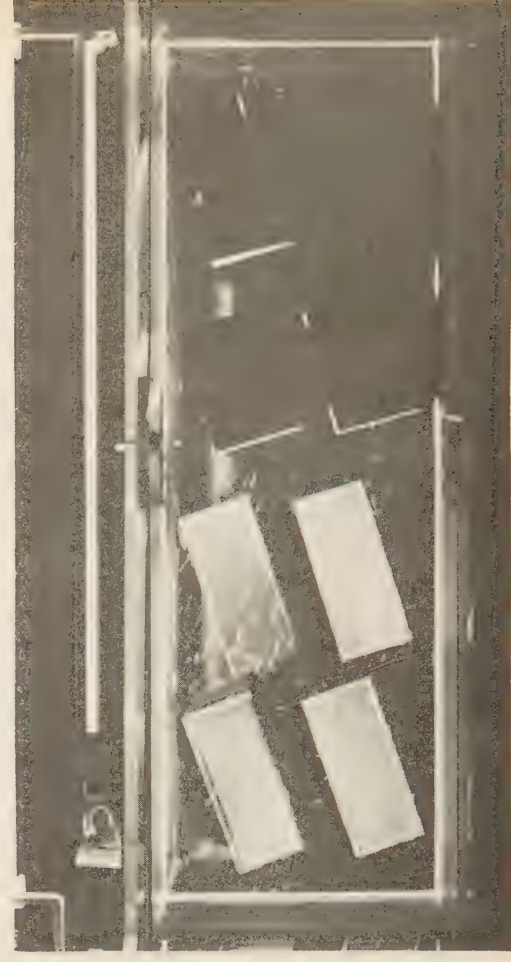
AXE DU BRULEUR



VOUTE



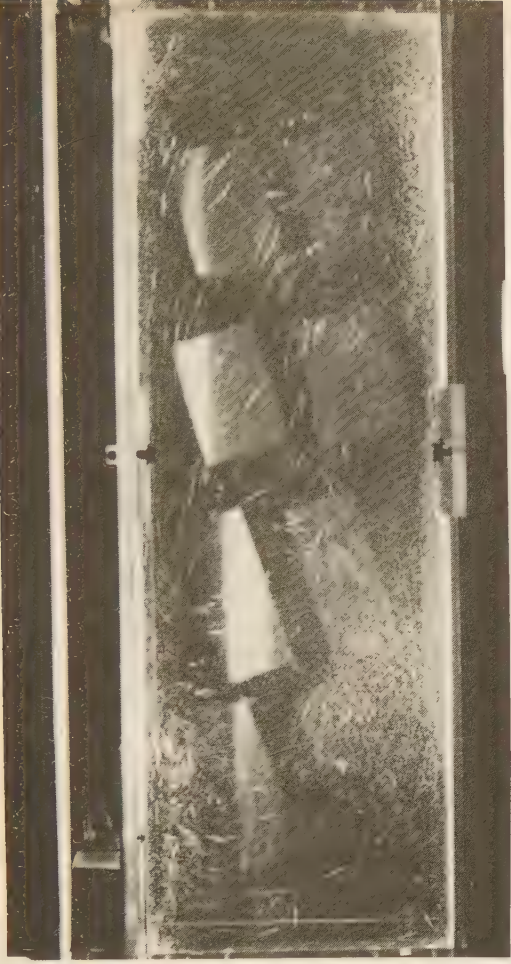
TETES DES LINGOTS H.B.



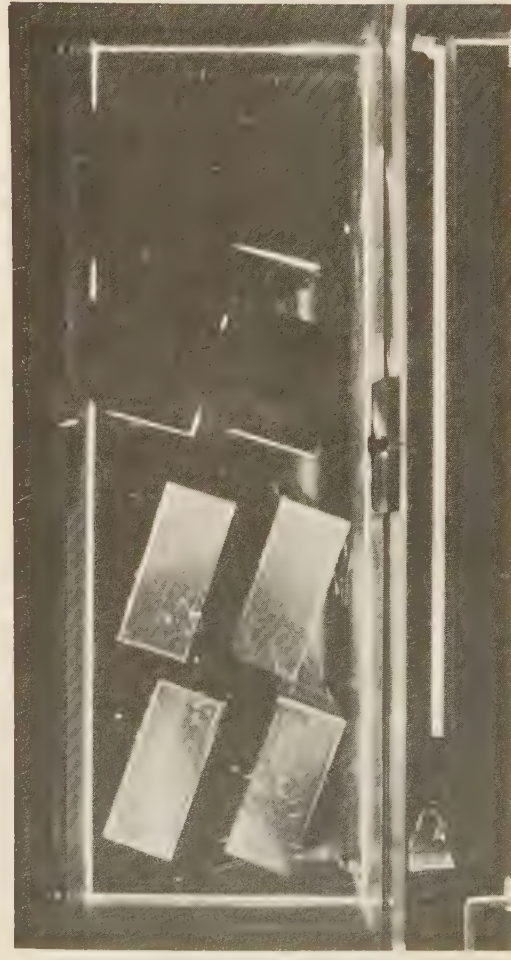
TETES DES LINGOTS E



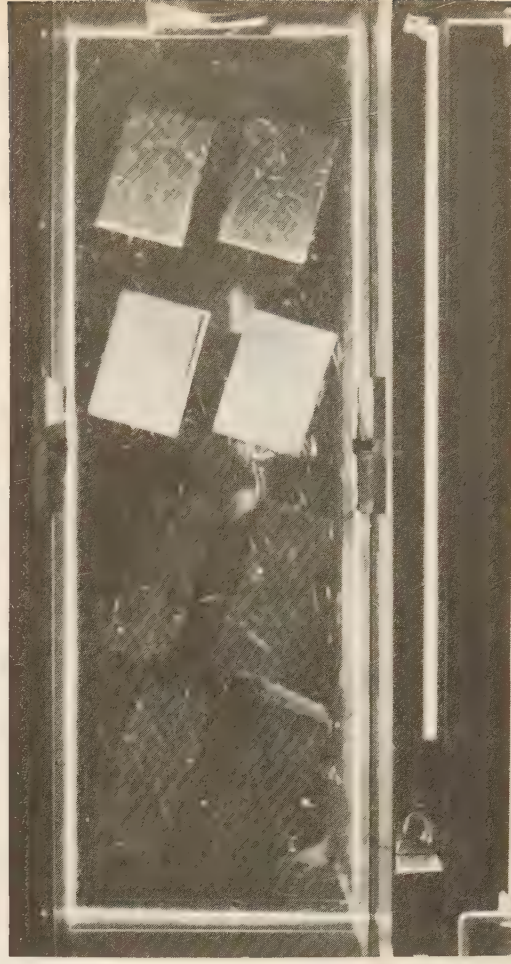
AXE DU BRULEUR



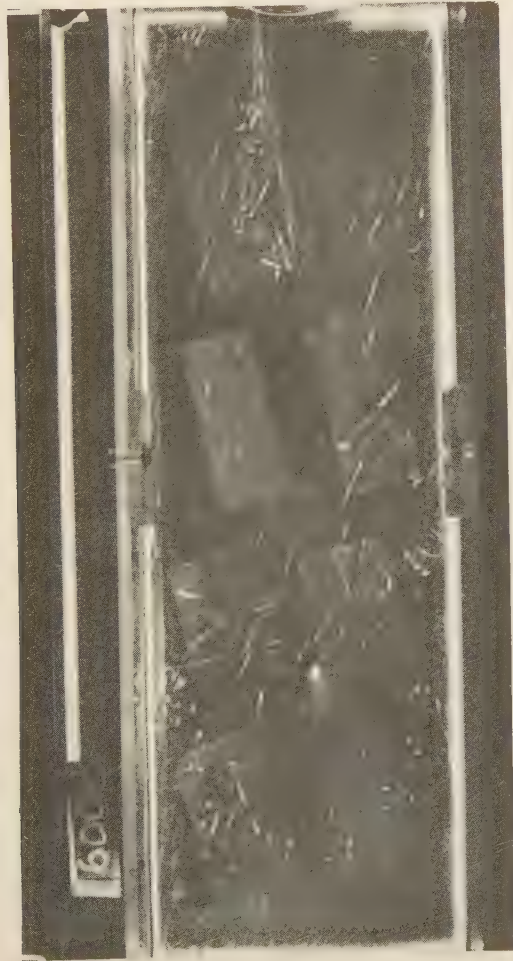
VOUTE



TETES DES LINGOTS E



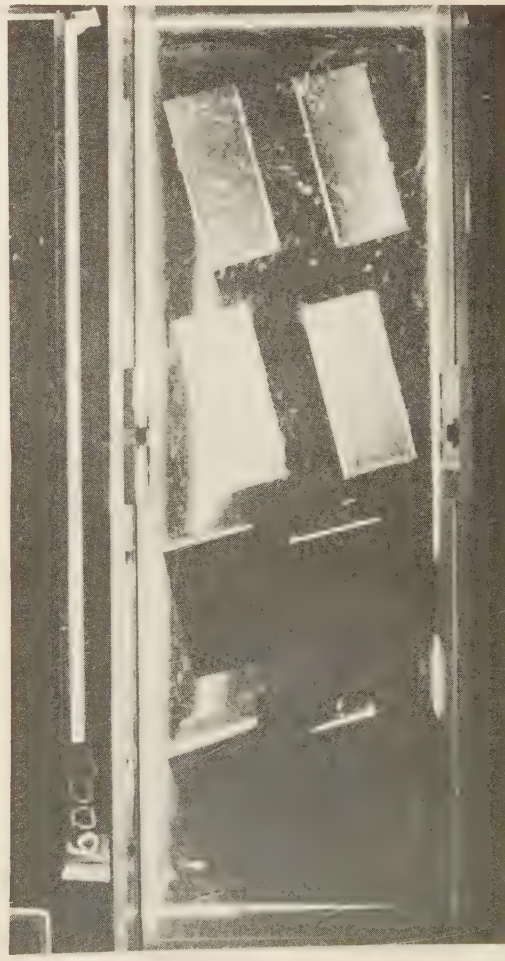
TETES DES LINGOTS H.B.



AXE DU BRULEUR



VOUTE



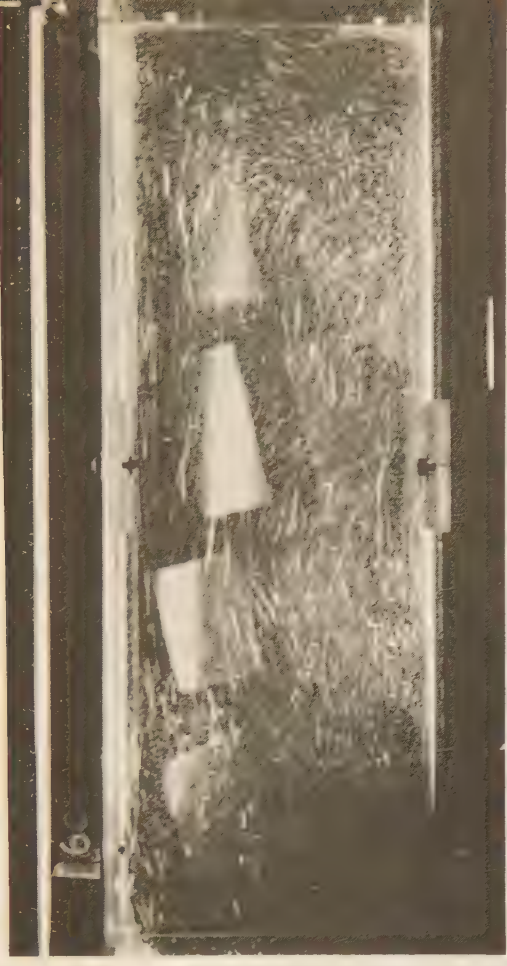
TETES DES LINGOTS E



TETES DES LINGOTS H.B.



AXE DU BRULEUR



VOUTE



TETES DES LINGOTS .H .B



TETES DES LINGOTS .E .

La flamme utilise comme combustible pour partie du fuel et, pour autre partie du gaz de haut-fourneau ; les débits sont donnés par :

$$(Q_f)_h = 242,5 \text{ kg/h pour le fuel,}$$

$$(Q_{h_f})_h = 1860 \text{ Nm}^3/\text{h pour les gaz de haut-fourneau.}$$

Le P.C.I. du fuel est de 9480 kilocalories par kilogrammes, donc l'énergie calorifique obtenue du seul fait du fuel est de 2300 thermies/h environ.

Pour le gaz de haut-fourneau, le P.C.I. est égal à 873 kcal/m^3 . Compte tenu de la composition chimique du gaz de haut-fourneau, il faut 56 m^3 d'air pour brûler 100 m^3 de gaz ; d'autre part, la quantité théorique d'air nécessaire à la combustion du fuel est de l'ordre de $2560 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Nous admettons un excès d'air voisin de 13 %. Ainsi le débit d'air nécessaire est de l'ordre de

$$(Q_a)_h = 4439 \text{ m}^3 ,$$

alors que des mesures faites à SOLLAC ont donné des valeurs de l'ordre de $4441 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Nous prendrons

$$(Q_a)_h = 4440 \text{ Nm}^3/\text{h} .$$

Le débit total des fumées est donc égal à la somme des fumées relatives à la combustion du gaz de haut-fourneau et à la combustion du fuel, que nous avons augmenté du volume d'air nécessaire à sa vaporisation (60 Nm^3), soit

$$(Q_{\text{carneaux}})_h = 6250 \text{ Nm}^3/\text{h} .$$

Du fait de la température moyenne des fumées de l'ordre de 1230° (valeur mesurée sur le four) :

$$(Q_{\text{carneaux}})_h = 9,55 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nous admettons que les débits de gaz sont les mêmes pour chaque carneau, ainsi il est possible de déterminer la vitesse des fumées sur le four. L'aire de chaque sortie est de $0,75 \text{ m}^2$, donc :

$$(V_{\text{carneaux}})_h = \frac{9,55}{1,5} = 6,37 \text{ m/s} .$$

Des mesures de viscosité sur les fumées, effectuées à l'usine, ont montré que la viscosité dynamique était voisine de :

$$\nu = 2,18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} .$$

Compte tenu du diamètre hydraulique des carneaux,

$$d_{\text{carneaux}} = 0,928 \text{ m},$$

la valeur du nombre de Reynolds est égale à :

$$Re = 27 \ 110 .$$

D'après les remarques faites en I.1, nous prendrons :

$$Re = 27 \ 000 .$$

La connaissance de la masse volumique du gaz de haut-fourneau et de l'air, respectivement $1,238$ et $1,205 \text{ kg/m}^3$, permettent de déterminer le débit massique :

$$(Q_{m_{\text{carneaux}}})_h = 2,214 \text{ kg/s} .$$

Des deux valeurs précédentes nous déduisons l'impulsion au carneau

$$(I_{\text{carneaux}})_h = 14,1 \text{ N} .$$

Compte tenu du fait que nous ne voulons étudier le phénomène que par visualisation, nous ne simulerons les entrées de combustible et de comburant que par un seul injecteur.

Pour ce faire écrivons :

$$(I_{\text{brûleur}})_h \neq (Q_a V_a)_h + (Q_f V_f)_h + (Q_{hf} V_{hf})_h$$

Le diamètre de la lance à fuel et à gaz de haut-fourneau est de 18 centimètres, ce qui permet de calculer la vitesse de sortie du gaz de haut-fourneau :

$$(V_{hf})_h = 23,3 \text{ m/s},$$

compte tenu de la température : 40°C.

Ainsi nous avons :

$$(I_{hf})_h = (V_{hf} Q_{hf})_h = 14,91 \text{ N}.$$

Pour l'impulsion due au fuel, nous utiliserons une formule due à THRING :

$$(I_f)_h = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} P_o V_o m_A (m_A + m_F) \left\{ 1 + \frac{1}{\gamma} \left(1 - \frac{P}{P_o} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right) \right\}$$

γ est le rapport des chaleurs spécifiques = 1,31,

$P_o = 7$ bars pression génératrice,

V_o volume spécifique de la vapeur d'eau à 300°C sous 7 bars,

m_A et m_F sont les débits massiques de fuel et d'air de vaporisation ;
ici $m_A = 0,02 \text{ kg/s}$, $m_F = 6,74 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$;

ainsi l'impulsion due au fuel est égale à

$$(I_f)_h = 29,25 \text{ N}.$$

Le débit massique d'air est :

$$(Q_a)_h = \frac{4440 \times 1,205}{3600} = 1,49 \text{ kg/s},$$

compte tenu des dimensions de l'injecteur, la vitesse du fluide s'écrit :

$$(V_a)_h = 12,22 \text{ m/s},$$

et l'impulsion :

$$(I_a)_h = 18,21 \text{ N}.$$

L'impulsion totale au brûleur est donc égale à :

$$(I_{\text{brûleur}})_h = 63,36 \text{ N}.$$

La similitude nécessite la vérification de

$$(Re)_h = (Re)_c \quad \text{au carreaux}$$

donc

$$V_c = \left(\frac{Re \cdot v}{\delta} \right)_c$$

Nous utiliserons de l'air à température ambiante, soit 20°C et $v_c = 0,15 \cdot 10^{-4}$ MKSA ; d'autre part, le diamètre hydraulique des carreaux est réduit dans le rapport 1/10

$$\delta_c = 0,921 \cdot 10^{-1} \text{ m},$$

ce qui entraîne

$$(V_{\text{carreaux}})_c = 4,364 \text{ m/s}.$$

Le débit volumique sur la maquette doit être de :

$$(Q_v)_c = 1,5 \cdot 10^{-2} \times 4,364 = 6,54 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s},$$

alors que le débit massique devient (20°C)

$$(Q_m)_c = 7,88 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}.$$

La détermination du diamètre équivalent du brûleur, est obtenue grâce à la formule (4.2) qui nécessite la détermination de :

$$\left(\frac{I_{\text{brûleur}}}{I_{\text{carreaux}}} \right)_h = \frac{62,36}{14,1} = 4,42$$

Sur le modèle

$$(I_{\text{carreaux}})_c = 4,364 \times 7,88 \cdot 10^{-2} = 34,39 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

$$(I_{\text{brûleur}})_c = 34,23 \times 4,42 = 1,52 \text{ N}$$

Le diamètre équivalent de l'injecteur sera déterminé par :

$$(\delta_{\text{brûleur}})_c = \sqrt{\frac{4 \times (Q_m)_c \times (Q_v)_c}{\pi (I_{\text{brûleur}})_c}}$$

où

$$(Q_m)_c = 7,88 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s ,}$$

$$(Q_v)_c = 6,54 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s ,}$$

$$(I_{\text{brûleur}})_c = 1,52 \text{ N ,}$$

donc :

$$(\delta_{\text{brûleur}})_c = 65,7 \pm 66 \text{ mm ,}$$

$$(V_{\text{brûleur}})_c = 19,2 \text{ m/s .}$$

Les mesures de débit ont été faites sur la maquette, grâce à un débitmètre à diaphragme conforme à la norme NF 10-101.

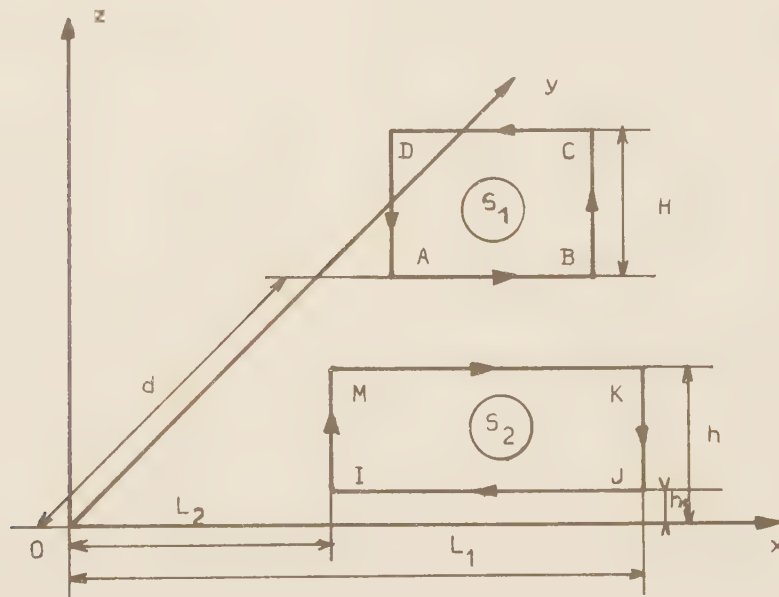
DETERMINATION DE FACTEURS GEOMETRIQUES DANS QUELQUES CAS PARTICULIERS

A-II.1 Cas de deux surfaces rectangulaires dont les plans et les arêtes sont parallèles

Soient (fig. 1II) :

- $\bar{L}_1$ et $\bar{L}_2$ les abscisses réduites des côtés verticaux de la surface rectangulaire S_1 ,
 - $\bar{h}_1$ et $\bar{h}$ les ordonnées réduites des côtés horizontaux de S_1 ,
 - $\bar{d}$ la distance réduite des plans verticaux contenant S_1 et S_2 .
- S_2 .

Tandis que les abscisses réduites $\bar{A}$ et $\bar{B}$, ainsi que la hauteur $\bar{H}$ seront caractéristiques de la surface S_2 .



- FIGURE 1-II -

Avec $dy_1 \equiv 0$, $dy_2 \equiv 0$, et les paramètres introduits ci-dessus, la formule (25) devient :

$$\begin{aligned}
 2\pi \bar{S}_1 F_{1-2} = & \int_{\bar{L}_1}^{\bar{L}_2} d\bar{x}_1 \left\{ \int_{\bar{A}_1}^{\bar{B}_1} \text{Log}[(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + \bar{d}^2 + \bar{h}_1^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{x}_2 + \int_{\bar{C}}^{\bar{D}} \text{Log}[(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + (\bar{H} - \bar{h}_1)^2 + \bar{d}^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{x}_2 \right\} \\
 & + \int_{\bar{L}_1}^{\bar{L}_2} d\bar{x}_1 \left\{ \int_{\bar{A}_1}^{\bar{B}_1} \text{Log}[(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + \bar{d}^2 + \bar{h}_2^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{x}_2 + \int_{\bar{C}}^{\bar{D}} \text{Log}[(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + \bar{d}^2 + \bar{h}_2^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{x}_2 \right\} \\
 & + \int_{\bar{H}}^{\bar{h}_1} d\bar{z}_1 \left\{ \int_{\bar{H}}^{\bar{O}} \text{Log}[(\bar{A}_1 - \bar{L}_2)^2 + \bar{d}^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \int_{\bar{O}}^{\bar{H}} \text{Log}[(\bar{B}_1 - \bar{L}_2)^2 + \bar{d}^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 \right\} \\
 & + \int_{\bar{H}_1}^{\bar{H}} d\bar{z}_1 \left\{ \int_{\bar{H}}^{\bar{O}} \text{Log}[(\bar{A}_1 - \bar{L}_1)^2 + \bar{d}^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \int_{\bar{O}}^{\bar{H}} \text{Log}[(\bar{B}_1 - \bar{L}_1)^2 + \bar{d}^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 \right\}
 \end{aligned}$$

(1-II)

Nous constatons qu'il suffit de calculer formellement une intégrale du type :

$$I = \int_{\alpha}^{\rho} d\bar{x}_1 \int_{\gamma}^{\eta} \text{Log}[(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + \bar{d}^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{x}_2. \quad (2-II)$$

Après intégration en $\bar{x}_2$ et $\bar{x}_1$ (2-II) s'écrit :

$$\begin{aligned}
 2I = & \frac{1}{2} \left\{ [(\gamma - \rho)^2 + \bar{d}^2] [\text{Log}((\gamma - \rho)^2 + \bar{d}^2) - 1] - [(\gamma - \alpha)^2 + \bar{d}^2] [\text{Log}((\gamma - \alpha)^2 + \bar{d}^2) - 1] \right. \\
 & - [(\eta - \rho)^2 + \bar{d}^2] [\text{Log}((\eta - \rho)^2 + \bar{d}^2) - 1] + [(\eta - \alpha)^2 + \bar{d}^2] [\text{Log}((\eta - \alpha)^2 + \bar{d}^2) - 1] \Big\} \\
 & - 2(\eta - \gamma)(\rho - \alpha) - 2\bar{d}^2 \left[\frac{\gamma - \alpha}{\bar{d}} \text{Arctg} \frac{\gamma - \alpha}{\bar{d}} - \frac{1}{2} \text{Log} \left(1 + \frac{(\gamma - \alpha)^2}{\bar{d}^2} \right) \right. \\
 & - \frac{\gamma - \rho}{\bar{d}} \text{Arctg} \frac{\gamma - \rho}{\bar{d}} + \frac{1}{2} \text{Log} \left(1 + \frac{(\gamma - \rho)^2}{\bar{d}^2} \right) \Big] + 2\bar{d}^2 \left[\frac{\eta - \alpha}{\bar{d}} \text{Arctg} \frac{\eta - \alpha}{\bar{d}} \right. \\
 & - \frac{1}{2} \text{Log} \left(1 + \frac{(\eta - \alpha)^2}{\bar{d}^2} \right) - \frac{\eta - \rho}{\bar{d}} \text{Arctg} \frac{\eta - \rho}{\bar{d}} + \frac{1}{2} \text{Log} \left(1 + \frac{(\eta - \rho)^2}{\bar{d}^2} \right) \Big]
 \end{aligned} \quad (3-II)$$

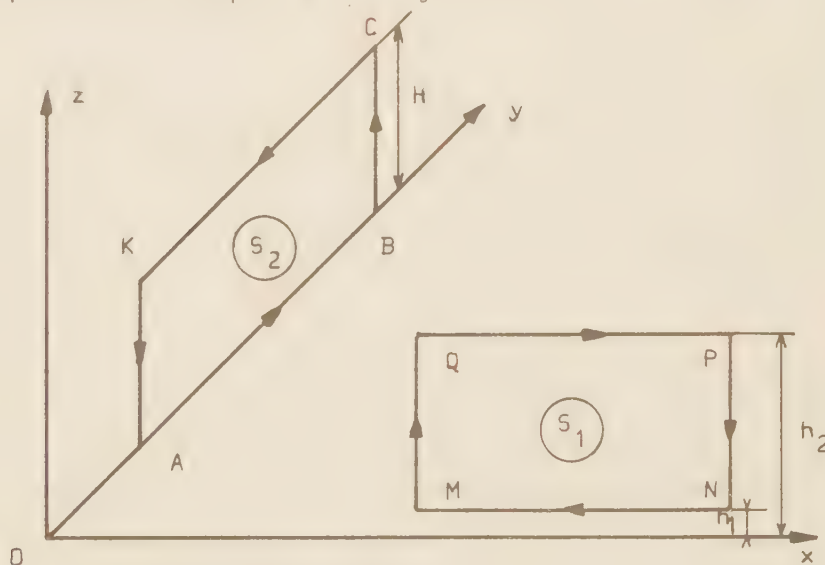
La programmation sur ordinateur est simple. En effet, il suffit d'un sous programme calculant $I(\alpha, \rho, \gamma, \eta, \bar{d})$ suivant (3-II) et de huit appels dans le programme principal pour déterminer F_{1-2} .

Avec un ordinateur IBM 1800, ayant un cycle de base de 4 μ s, les calculs durent environ 10 secondes.

Quelques valeurs d'essais appropriées ont permis de constater que le programme fournissait les mêmes valeurs que celles indiquées par D.C. HAMILTON et W.A. MORGAN [28], dans le cas d'une configuration A_1 .

A-II.2 Cas de deux surfaces rectangulaires ayant deux arêtes verticales, et dont les plans sont perpendiculaires

La détermination du facteur géométrique est réalisée pour la disposition indiquée à la figure 2-II.



- FIGURE 2-II -

Les deux surfaces S_1 et S_2 sont définies par :

- les abscisses réduites $\bar{M}_1$ et $\bar{N}_1$ des arêtes verticales de la surface S_1 ,

- les valeurs de $\bar{h}_1$ et $\bar{h}_2$, ordonnées réduites suivant oz des côtés MN et PQ de S_1 ,
- les coordonnées réduites des points A et B, limites horizontales de S_2 ,
- $\bar{H}$ ordonnée réduite suivant o $\bar{z}$ de la limite supérieure de S_2 .

Comme dans le cas précédent nous appliquons l'égalité (25). La surface S_1 étant contenue dans le plan x o z , $d\bar{y}_1$ est identiquement nul, il en est de même pour $d\bar{x}_2$, (25) se réduit à :

$$2 \pi \bar{S}_1 F_{1-2} = \oint_{c_1} \oint_{c_2} \text{Log } \bar{r} d\bar{z}_1 d\bar{z}_2 ,$$

soit en développant

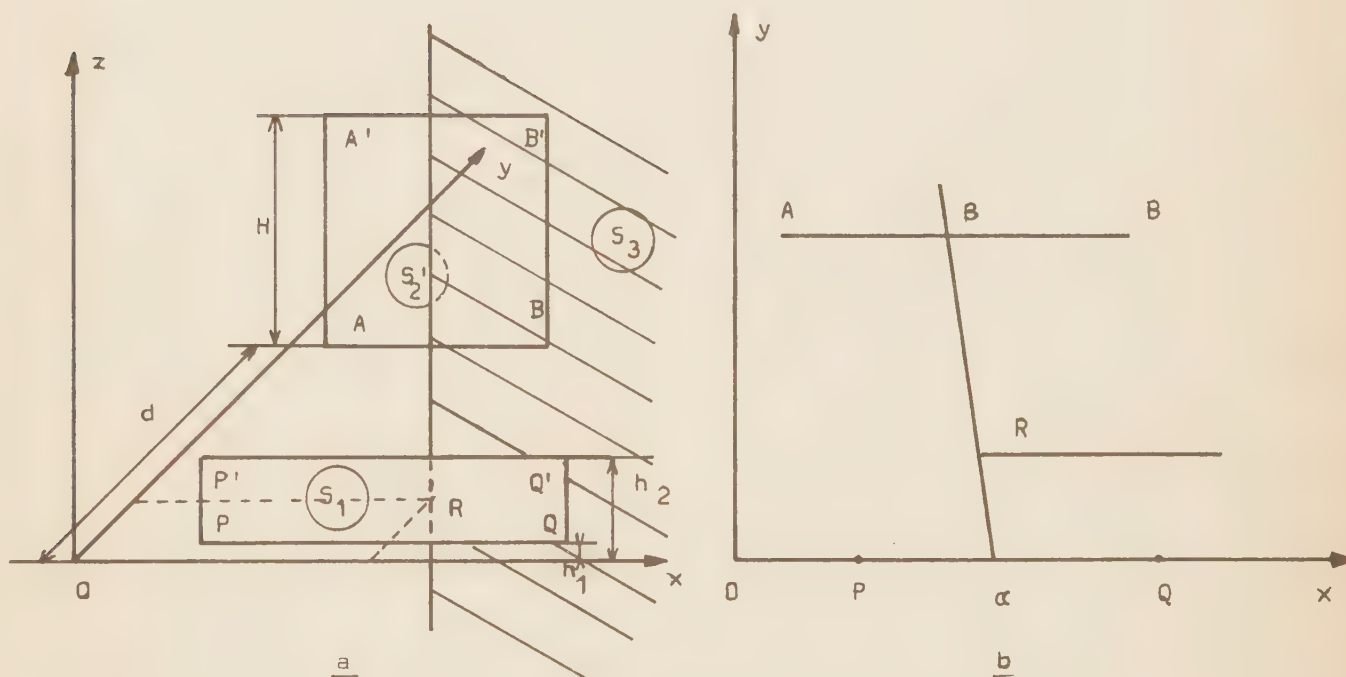
$$\begin{aligned} 2\pi \bar{S}_1 F_{1-2} = & \int_{\bar{h}_2}^{\bar{h}_1} d\bar{z}_1 \left\{ \int_0^{\bar{H}} \text{Log} [(\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2 + \bar{M}_1^2 + \bar{A}_2^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \right. \\ & \left. \int_0^{\bar{H}} \text{Log} [(\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2 + \bar{M}_1^2 + \bar{B}_2^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 \right\} + \int_{\bar{h}_1}^{\bar{h}_2} d\bar{z}_1 \left\{ \int_0^{\bar{H}} \text{Log} [(\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2 + \bar{N}_1^2 + \bar{A}_2^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 \right. \\ & \left. + \int_0^{\bar{H}} \text{Log} [(\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2 + \bar{N}_1^2 + \bar{B}_2^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 \right\} \quad (4-II) \end{aligned}$$

Remarquons que toutes les intégrales ci-dessus sont de la forme de (2-II) ; donc le programme sera constitué de quatre appels de la fonction I ($\alpha, \rho, \gamma, \eta, \bar{d}$) relativement aux quatre parties de (4-II).

Le temps de calcul est sensiblement inférieur à celui du cas précédent.

A-II.3 Cas de deux surfaces rectangulaires, dont les côtés et les plans sont parallèles, entre lesquelles est interposé un demi-plan obstacle à arête verticale

La répartition des différents éléments de ce cas de figure est donnée en 3-II.



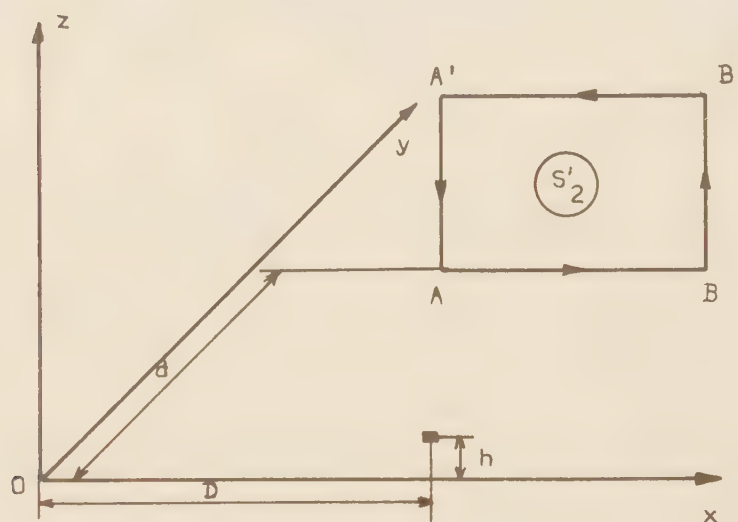
- FIGURE 3-II -

- $\bar{h}_1$ et $\bar{h}_2$ ordonnées réduites suivant oz des côtés horizontaux de S_1 ,
- $\bar{P}_1$ et $\bar{Q}_1$ abscisses réduites des arêtes verticales de S_1 ,
- $\bar{A}_1$ et $\bar{B}_1$ abscisses réduites des côtés verticaux de la surface S_2 ,
- $\bar{H}$ hauteur réduite de S_2 ,
- $\bar{R}_1$ et $\bar{R}_2$ coordonnées réduites de l'arête du demi-plan obstacle S_3 , dans le plan xoy.

La méthode de calcul utilisée est basée sur un procédé de discrétisation. Découpons la surface S_1 en un ensemble d'éléments dS_1

puis on détermine le facteur d'angle entre un élément dS_1 et la surface S_2 , en tenant compte du demi-plan obstacle S_3 . Ensuite, la sommation des facteurs d'angle relatifs à chaque élément de S_1 , permet d'obtenir le facteur géométrique global.

Il est donc nécessaire de déterminer le facteur géométrique d'une surface S'_2 rectangulaire, depuis un élément de surface dS_1 , dont le plan est parallèle à S'_2 (fig. 4-II).



- Figure 4-II -

Nous utilisons la formule (23) qui devient ici :

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \oint_{c_2} \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\bar{r}^2} d\bar{z}_2 + \oint_{c_2} \frac{\bar{z}_2 - \bar{z}_1}{\bar{r}^2} d\bar{x}_2 \right\} ,$$

soit en intégrant par rapport à $\bar{x}_2$ et $\bar{z}_2$

$$\begin{aligned}
 2\pi F_{d1-2} = & \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\bar{d}^2}{\bar{h}^2}}} \left[\operatorname{Arctg} \frac{\bar{B}_1 - \bar{D}}{\sqrt{\bar{d}^2 + \bar{h}^2}} - \operatorname{Arctg} \frac{\bar{A}_1 - \bar{D}}{\sqrt{\bar{d}^2 + \bar{h}^2}} \right] \\
 & + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\bar{d}}{\bar{B}_1 - \bar{D}}\right)^2}} \left[\operatorname{Arctg} \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\sqrt{(\bar{B}_1 - \bar{D})^2 + \bar{d}^2}} + \operatorname{Arctg} \frac{\bar{h}}{\sqrt{(\bar{B}_1 - \bar{D})^2 + \bar{d}^2}} \right] \\
 & + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\bar{d}^2}{(\bar{H} - \bar{h})^2}}} \left[\operatorname{Arctg} \frac{\bar{B}_1 - \bar{D}}{\sqrt{(\bar{H} - \bar{h})^2 + \bar{d}^2}} - \operatorname{Arctg} \frac{\bar{A}_1 - \bar{D}}{\sqrt{(\bar{H} - \bar{h})^2 + \bar{d}^2}} \right] \\
 & - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\bar{d}}{\bar{A}_1 - \bar{D}}\right)^2}} \left[\operatorname{Arctg} \frac{\bar{h}}{\sqrt{(\bar{A}_1 - \bar{D})^2 + \bar{d}^2}} + \operatorname{Arctg} \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\sqrt{(\bar{A}_1 - \bar{D})^2 + \bar{d}^2}} \right] \quad (5-II)
 \end{aligned}$$

où $\bar{D}$ et $\bar{h}$ sont les coordonnées réduites dans x ou z du centre de dS_1 .

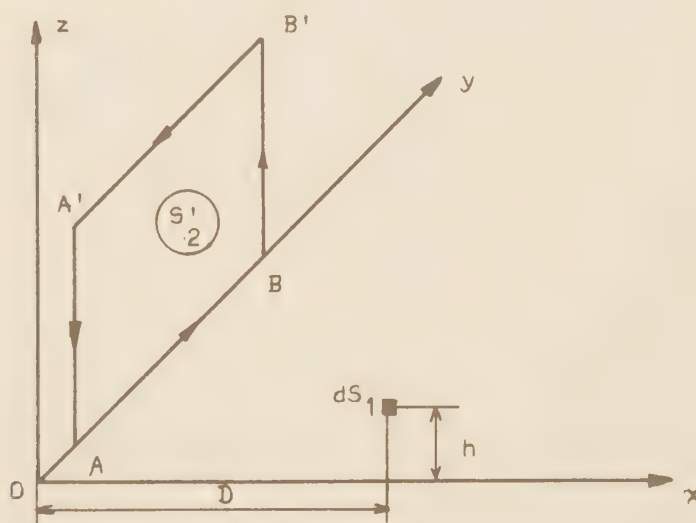
La détermination de F_{d1-2} compte tenu du demi-plan obstacle S_3 , s'effectue de la manière suivante:

Soit α la projection sur ox du point courant de S_1 , β le point d'intersection de αR avec AB , et β' le point d'intersection de la verticale issue de β avec $A'B'$ (fig. 3-II).

- Si $\bar{\beta}$ appartient à $(\bar{A}, \bar{B})$, la surface S_2' est formée par A, β, β', A' ,
- Si l'abscisse réduite de β est supérieure à celle de B , on détermine $F_{d1-A \beta \beta' A'}$,
- Si l'abscisse réduite de β est inférieure à celle de A , F_{d1-2} sera nul.

A-II.4 Cas de deux rectangles ayant deux côtés verticaux, dont les plans sont perpendiculaires et entre lesquels est interposé un demi-plan obstacle à arête verticale

De la même manière que dans le cas précédent, on procèdera par discrétisation. Nous sommes donc dans l'obligation de déterminer préalablement le facteur d'angle d'une surface S'_2 , depuis un élément de surface dS_1 , dont le plan est perpendiculaire à S'_2 (fig. 5II).



- FIGURE 5-II -

Dans ce cas, la formule (23) se réduit à :

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \oint_{c_2} \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\bar{r}^2} d\bar{z}_2$$

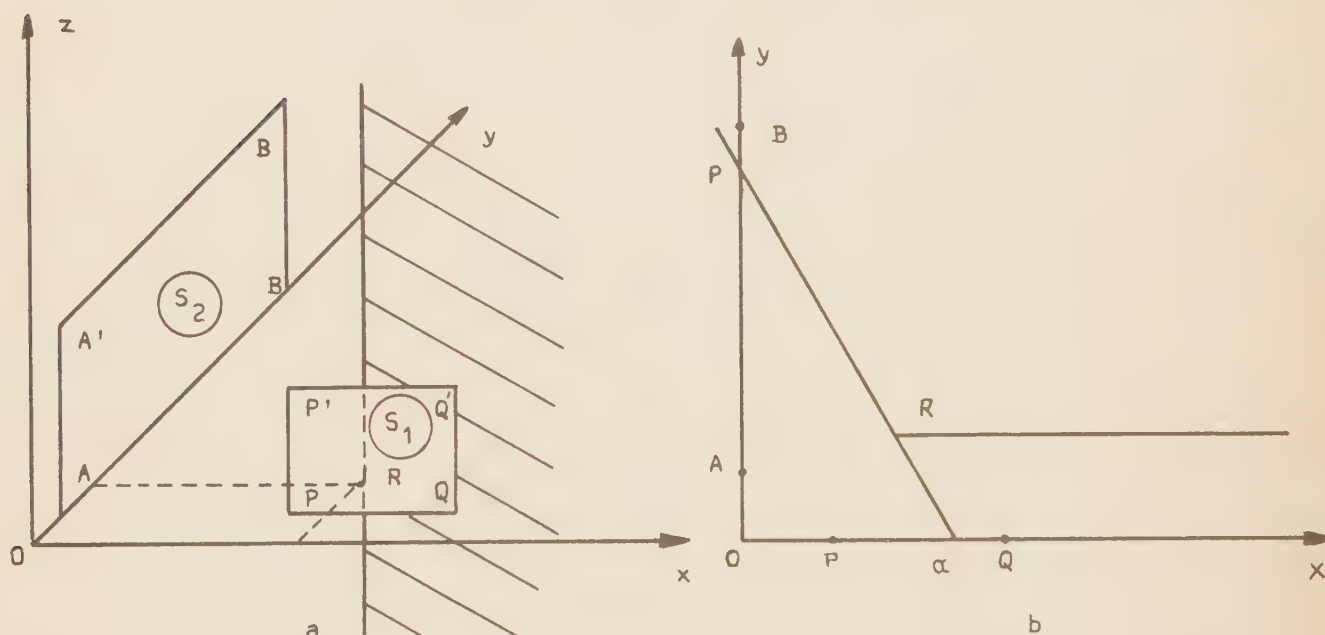
qui, après intégration, s'écrit :

$$2\pi F_{d1-2} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\bar{B}_2}{\bar{D}}\right)^2}} \left[\text{Arctg} \frac{\bar{h}}{\sqrt{\bar{B}_2^2 + \bar{D}^2}} + \text{Arctg} \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\sqrt{\bar{D}^2 + \bar{B}_2^2}} \right] + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\bar{A}_2}{\bar{D}}\right)^2}} \left[\text{Arctg} \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\sqrt{\bar{D}^2 + \bar{A}_2^2}} + \text{Arctg} \frac{\bar{h}}{\sqrt{\bar{D}^2 + \bar{A}_2^2}} \right] \quad (6-11)$$

où $\bar{D}$ et $\bar{h}$ sont les coordonnées réduites dans x o z , du centre de l'élément dS_1 .

Notons que, si on choisit dans (6-II) les mêmes paramètres que HAMILTON et MORGAN [28] (cas P_1), on obtient la même formulation.

Dans le cas actuel, nous utiliserons les mêmes variables qu'en A-II.3 ; mais $\bar{A}$ et $\bar{B}$ représenteront les ordonnées réduites suivant oy des côtés verticaux de S_2 et $\bar{d}$ disparaîtra (fig. 6.IIa).



- FIGURE 6-II -

Après avoir fixé l'élément de surface dS_1 , nous cherchons la valeur de F_{d1-2} , compte tenu de S_3 . Puis, le même calcul est exécuté pour chaque élément de S_1 . La sommation des valeurs de F_{d1-2} permet d'obtenir F_{1-2} .

Le calcul de F_{d1-2} , compte tenu de S_3 est réalisé comme suit :

soit $\bar{\alpha}$ l'abscisse réduite du centre de dS_1 et ρ l'intersection de αR avec AB ; trois cas peuvent se présenter :

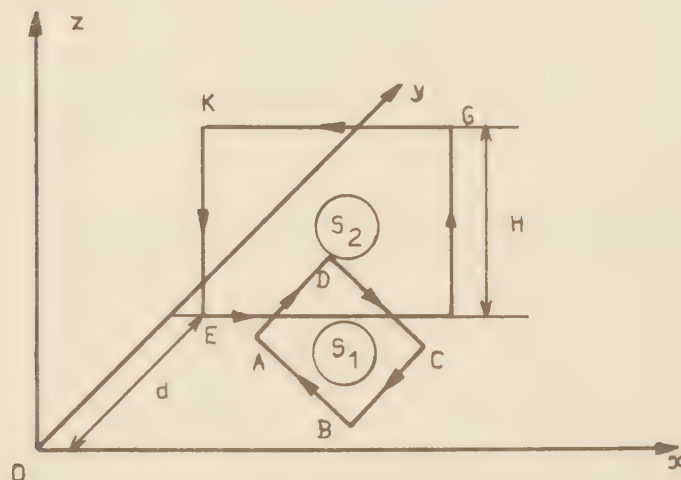
- $\bar{\rho}$ est supérieur à $\bar{B}$, alors on a $F_{dS_1-ABB'A'}$,
- $\bar{\rho}$ est compris entre $\bar{A}$ et $\bar{B}$, la surface S_2 sera constituée par $A \rho \rho'A'$; ρ' est défini comme B' en A-II.3,
- $\bar{\rho}$ est inférieur à $\bar{A}$; le facteur de vue F_{d1-2} est nul.

D'autre part, si la pente de αR est positive, $\bar{p}$ est inférieur à $\bar{A}$. Cependant, la surface S_2 est vue toute entière depuis dS_1 ; donc le facteur géométrique doit être déterminé entre dS_1 et S_2 . Un test au cours du programme permet de savoir si la pente de αR est positive.

A-II.5 Cas de deux surfaces rectangulaires planes parallèles, dont deux côtés forment un angle α

Deux côtés de S_2 sont horizontaux, l'un étant situé dans le plan x o y (fig. 7.II).

Soient ABCD et EFGH respectivement les sommets de S_1 et S_2 .



- FIGURE 7-II -

Appliquée à ce cas, la formule (25) devient :

$$2\pi \bar{S}_1 F_{1-2} = \oint_{C_1} \oint_{C_2} \left\{ \text{Log } \bar{r} d\bar{x}_1 d\bar{x}_2 + \text{Log } \bar{r} d\bar{z}_1 d\bar{z}_2 \right\} \quad (7-II)$$

avec

$$\bar{S}_1 = \sqrt{(\bar{A}_1 - \bar{B}_1)^2 + (\bar{A}_3 - \bar{B}_3)^2} \times \sqrt{(\bar{C}_1 - \bar{B}_1)^2 + (\bar{C}_3 - \bar{B}_3)^2}.$$

On obtient une somme de seize intégrales du type :

$$I = \int_{\bar{B}}^{\bar{A}} d\bar{x}_1 \int_{\bar{E}}^{\bar{F}} \text{Log} [(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + \bar{d}^2 + \bar{z}_1^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{x}_2. \quad (8-II)$$

Ecrivons que sur AB $\bar{z}_1 = a \bar{x}_1 + b$; alors (8-II) devient :

$$I = \int_{\bar{B}}^{\bar{A}} d\bar{x}_1 \int_{\bar{E}}^{\bar{F}} \text{Log} [(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + \bar{d}^2 + (a\bar{x}_1 + b)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{x}_2.$$

Après une première intégration en $\bar{x}_1$, (8-II) s'écrit :

$$I = \frac{1}{2} \int_{\bar{B}}^{\bar{A}} \left\{ (\bar{F} - \bar{x}_1) \text{Log} [\alpha^2 + (\bar{F} - \bar{x}_1)^2] - (\bar{E} - \bar{x}_1) \text{Log} [\alpha^2 + (\bar{E} - \bar{x}_1)^2] \right. \\ \left. - 2(\bar{F} - \bar{E}) + 2\alpha \left[\text{Arctg} \frac{\bar{F} - \bar{x}_1}{\alpha} - \text{Arctg} \frac{\bar{E} - \bar{x}_1}{\alpha} \right] \right\} d\bar{x}_1, \quad (9-II)$$

avec

$$\alpha^2 \bar{x}_1^2 + 2 a b \bar{x}_1 + b^2 + \bar{d}^2.$$

L'égalité $I = I_1 + I_1' + I_2 + I_3$ permet de séparer les quatre parties de (9-II).

$$I_1 = \frac{1}{2} \int_{\bar{E}}^{\bar{A}} (\bar{F} - \bar{x}_1) \text{Log} [\alpha^2 + (\bar{F} - \bar{x}_1)^2] d\bar{x}_1$$

après intégration s'écrit :

$$I_1 = \frac{1}{2} \left\{ (\bar{F} - \bar{A}) \left[\bar{A} \text{Log} \alpha^0 + \left(\bar{A} + \frac{\rho'}{2} \right) \text{Log} \left[\left(\bar{A} + \frac{\rho'}{2} \right)^2 + \gamma' - \frac{\rho'^2}{4} \right] \right] - (\bar{F} - \bar{B}) \right. \\ \left[\bar{B} \text{Log} \alpha^0 + \left(\bar{B} + \frac{\rho'}{2} \right) \text{Log} \left[\left(\bar{B} + \frac{\rho'}{2} \right)^2 + \gamma' - \frac{\rho'^2}{4} \right] \right] - 2(\bar{F} - \bar{A}) \left(\bar{A} + \frac{\rho'}{2} \right) + 2(\bar{F} - \bar{B}) \left(\bar{B} + \frac{\rho'}{2} \right) \right. \\ \left. + 2 \sqrt{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}} \left[(\bar{F} - \bar{A}) \text{Arctg} \frac{\bar{A} + \frac{\rho'}{2}}{\sqrt{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}}} - (\bar{F} - \bar{B}) \text{Arctg} \frac{\bar{B} + \frac{\rho'}{2}}{\sqrt{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}}} \right] \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \text{Log } \alpha^0 (\bar{A}^2 - \bar{B}^2) + \frac{1}{2} \left[\left(\left(\bar{A} + \frac{\rho'}{2} \right)^2 + \gamma' - \frac{\rho'^2}{4} \right) \left[\text{Log} \left(\left(\bar{A} + \frac{\rho'}{2} \right)^2 + \gamma' - \frac{\rho'^2}{4} \right) - 1 \right] \right. \\
 & - \left. \left(\left(\bar{B} + \frac{\rho'}{2} \right)^2 + \gamma' - \frac{\rho'^2}{4} \right) \left[\text{Log} \left(\left(\bar{B} + \frac{\rho'}{2} \right)^2 + \gamma' - \frac{\rho'^2}{4} \right) - 1 \right] \right] - \bar{A}^2 + \bar{B}^2 \\
 & - \rho' (\bar{A} - \bar{B}) + 2 \left(\gamma' - \frac{\rho'^2}{4} \right) \left[\frac{\bar{A} + \frac{\rho'}{2}}{\sqrt{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}}} \text{Arctg} \frac{\bar{A} + \frac{\rho'}{2}}{\sqrt{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}}} - \frac{\bar{B} + \frac{\rho'}{2}}{\sqrt{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}}} \right. \\
 & \left. \text{Arctg} \frac{\bar{B} + \frac{\rho'}{2}}{\sqrt{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}}} - \frac{1}{2} \text{Log} \left(1 + \frac{(\bar{A} - \frac{\rho'}{2})^2}{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}} \right) + \frac{1}{2} \text{Log} \left(1 + \frac{(\bar{B} - \frac{\rho'}{2})^2}{\gamma' - \frac{\rho'^2}{4}} \right) \right] \} \quad (10-II)
 \end{aligned}$$

avec :

$$\begin{aligned}
 \alpha^0 &= 1 + a^2, \\
 \rho' &= \frac{2(ab - \bar{F})}{1 + a^2}, \\
 \gamma' &= \frac{\bar{F}^2 + \bar{d}^2 + b^2}{1 + a^2}.
 \end{aligned} \quad (11-II)$$

I_1' sera de la forme de I_1 mais $\bar{F}$ sera remplacé par $\bar{E}$,

$$I_2 = (\bar{E} - \bar{F}) (\bar{A} - \bar{B}),$$

Quant à I_3 , de la forme $I_3 = \int_{\bar{B}}^{\bar{A}} I_3' d\bar{x}_1$ avec :

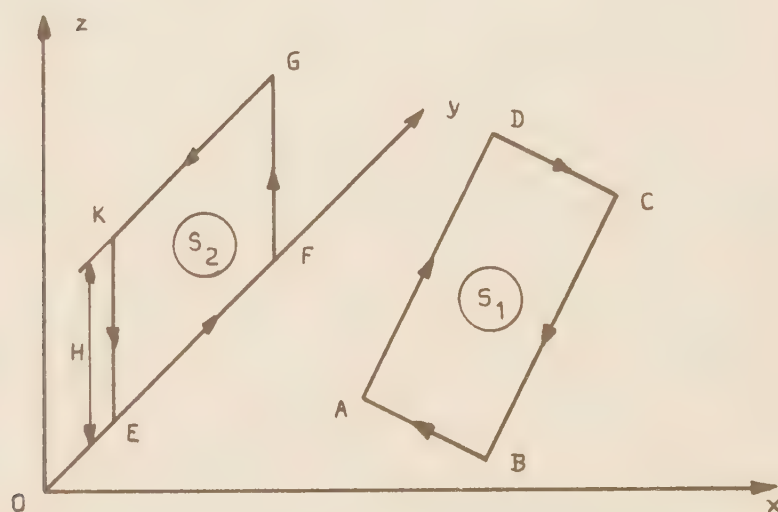
$$\begin{aligned}
 I_3' &= 2(a\bar{x}_1^2 + 2b\bar{a}\bar{x}_1 + b^2 + \bar{d}^2)^{\frac{1}{2}} \left[\text{Arctg} \frac{\bar{F} - \bar{x}_1}{(a\bar{x}_1^2 + 2ab\bar{x}_1 + b^2 + \bar{d}^2)^{\frac{1}{2}}} \right. \\
 & \quad \left. - \text{Arctg} \frac{\bar{E} - \bar{x}_1}{(a\bar{x}_1^2 + 2ab\bar{x}_1 + b^2 + \bar{d}^2)^{\frac{1}{2}}} \right]
 \end{aligned}$$

elle s'intègre numériquement suivant une méthode basée sur les polynômes de TCHEBICHEFF.

Les résultats obtenus dans le cas limite de deux surfaces à arêtes parallèles, sont identiques à ceux obtenus grâce à la formule A-II.1. De plus, ce mode de calcul peut s'appliquer à une surface S_1 formée par la partie intérieure d'un quadrilatère quelconque. Il suffirait de déterminer la valeur numérique de $\bar{S}_1$.

A-II.6 Cas de deux rectangles dont les plans sont perpendiculaires et les côtés forment un angle α

Les surfaces S_1 et S_2 sont définies de la même manière qu'au chapitre précédent ; seul $\bar{d}$ disparaît (fig. 8-II).



- FIGURE 8-II -

Dans ce cas de figure, (25) s'écrit :

$$2\pi \bar{S}_1 F_{1-2} = \oint_{c_1} \oint_{c_2} \text{Log } \bar{r} \, d\bar{z}_1 \, d\bar{z}_2 \quad (12-II)$$

avec

$$\bar{S}_1 = \sqrt{(\bar{B}_1 - \bar{A}_1)^2 + (\bar{B}_3 - \bar{A}_3)^2} \times \sqrt{(\bar{C}_1 - \bar{B}_1)^2 + (\bar{C}_3 - \bar{B}_3)^2}.$$

Soit en développant :

$$\begin{aligned}
 2\pi \bar{S}_1 F_{1-2} = & \int_{\bar{B}_3}^{\bar{A}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{F}_3}^{\bar{G}_3} \text{Log}[(a'_3 \bar{z}_1 + b'_3)^2 + \bar{F}_2^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \int_{\bar{A}_3}^{\bar{D}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{F}_3}^{\bar{G}_3} \text{Log}[(a'_4 \bar{z}_1 + b'_4)^2 \\
 & + \bar{F}_2^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \int_{\bar{D}_3}^{\bar{C}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{F}_3}^{\bar{G}_3} \text{Log}[(a'_5 \bar{z}_1 + b'_5)^2 + \bar{F}_2^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 \\
 & + \int_{\bar{C}_3}^{\bar{B}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{F}_3}^{\bar{G}_3} \text{Log}[(a'_6 \bar{z}_1 + b'_6)^2 + \bar{F}_2^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \int_{\bar{B}_3}^{\bar{A}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{K}_3}^{\bar{E}_3} \text{Log}[(a'_3 \bar{z}_1 + b'_3)^2 + \bar{E}_2^2 \\
 & + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \int_{\bar{A}_3}^{\bar{D}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{K}_3}^{\bar{E}_3} \text{Log}[(a'_4 \bar{z}_1 + b'_4)^2 + \bar{E}_2^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 \\
 & + \int_{\bar{D}_3}^{\bar{C}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{K}_3}^{\bar{E}_3} \text{Log}[(a'_5 \bar{z}_1 + b'_5)^2 + \bar{E}_2^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 + \int_{\bar{C}_3}^{\bar{B}_3} d\bar{z}_1 \int_{\bar{F}_3}^{\bar{G}_3} \text{Log}[(a'_6 \bar{z}_1 + b'_6)^2 + \bar{E}_2^2 \\
 & + (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2]^{\frac{1}{2}} d\bar{z}_2 , \quad (13-II)
 \end{aligned}$$

où $a'_3, b'_3, a'_4, b'_4, \dots$ sont respectivement les coefficients des droites BA, AD, DC et CB dans le plan z ou x suivant :

$$\bar{x} = a' \bar{z} + b'.$$

Il est aisé de remarquer que la forme de chaque intégrale est du même type que (8-II).

La partie programmation est donc assez voisine de celle du cas précédent. Les calculs relatifs à A-II.5 et A-II.6 sont inclus dans un seul programme.

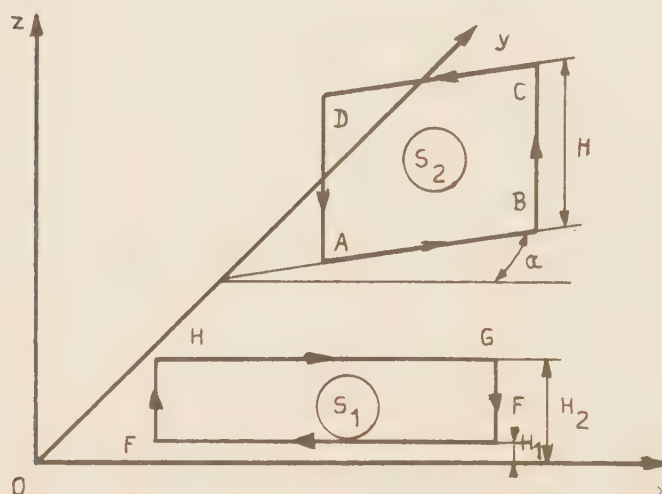
A-II.7 Cas de deux rectangles ayant deux arêtes verticales, dont les plans forment un dièdre d'angle α

La figure 9.II illustre ce cas :

- E, F, G et H sont les sommets de la surface S_1 , depuis

laquelle est déterminé le facteur de vue.

- A, B, C, D sont les sommets de S_2 qui sera complètement déterminé par les valeurs de $\bar{A}_1$, $\bar{A}_2$, $\bar{B}_1$, $\bar{B}_2$ et $\bar{H}$ respectivement coordonnées réduites de A, B et, hauteur réduite de S_2 .



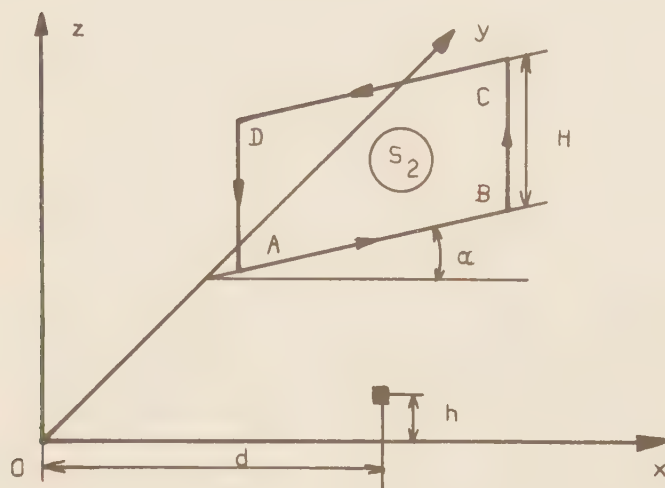
- FIGURE 9-11 -

L'utilisation de (25) conduit à des calculs sensiblement plus longs que dans les cas précédents. Cependant, après 8 à 10 minutes de calculs machine (IBM 1800), les résultats obtenus coïncident avec ceux de HAMILTON et MORGAN [28].

En raison du grand nombre de résultats à obtenir, nous avons utilisé l'égalité (23). Une méthode d'intégration double sur S_1 , basée sur les polynômes de TCHEBICHEFF, permet d'obtenir le résultat avec plus de précision qu'une méthode de discrétisation.

La convergence est assez rapide. Un découpage 15×15 permet d'obtenir une valeur suffisamment précise (de l'ordre de 10^{-3} par rapport aux résultats de [28]). Le gain de temps de calcul est d'environ 5 à 6 minutes par rapport au programme utilisant l'égalité (25).

La méthode nécessite la détermination du facteur d'angle entre un élément de S_1 (dS_1), et la surface S_2 (fig. 10.II).



- FIGURE 10-II -

L'égalité (23) devient :

$$2\pi F_{d1-2} = \oint_{c_2} \left[\frac{\bar{z}_1 - \bar{z}_2}{\bar{r}^2} d\bar{x}_2 + \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\bar{r}^2} d\bar{z}_2 \right], \quad (14-II)$$

après intégration :

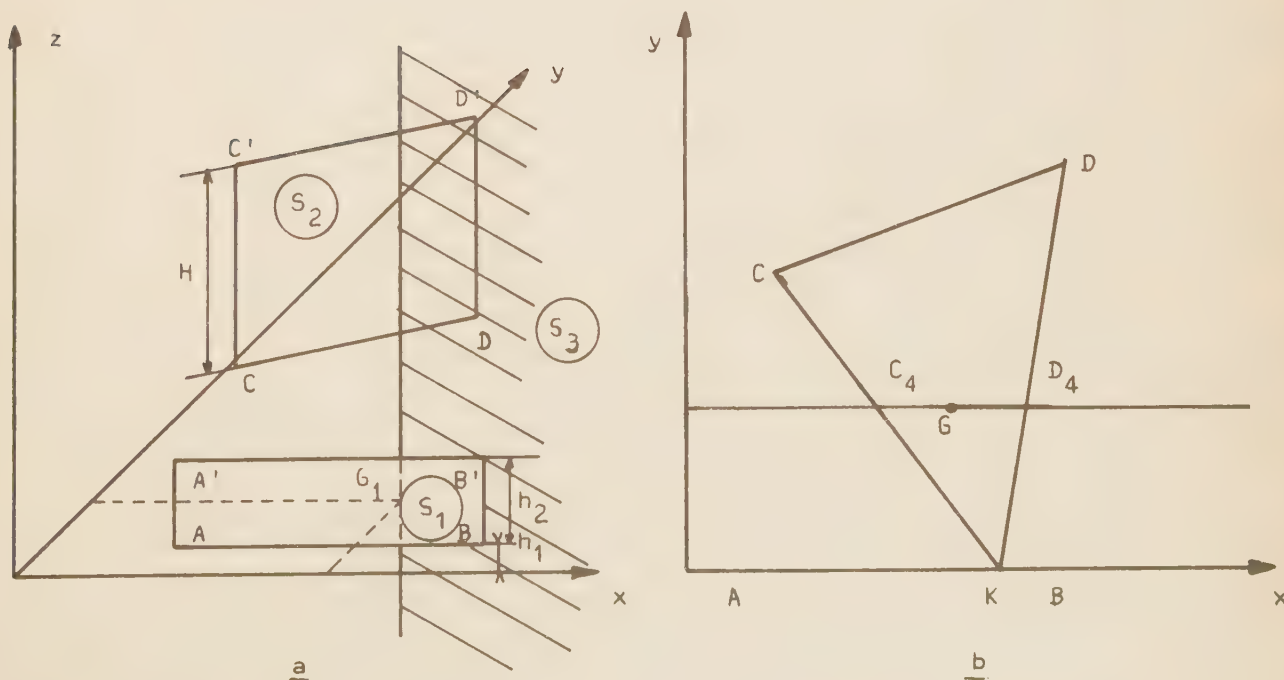
$$\begin{aligned} 2\pi F_{d1-2} = & \frac{\bar{h}}{\sqrt{(a\bar{d}+b)^2 + \bar{h}^2 + (1+a^2)}} \left[\text{Arctg} \frac{ab - \bar{d} + (1+a^2)\bar{B}_1}{\sqrt{(a\bar{d}+b)^2 + \bar{h}^2 + (1+a^2)}} \right. \\ & \left. - \text{Arctg} \frac{ab - \bar{d} + (1+a^2)\bar{A}_1}{\sqrt{(a\bar{d}+b)^2 + \bar{h}^2 + (1+a^2)}} \right] + \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\sqrt{(a\bar{d}+b)^2 + (\bar{H} - \bar{h})^2 + (1+a^2)}} \\ & \left[\text{Arctg} \frac{ab - \bar{d} + (1+a^2)\bar{B}_1}{\sqrt{(a\bar{d}+b)^2 + (\bar{H} - \bar{h})^2 + (1+a^2)}} - \text{Arctg} \frac{ab - \bar{d} + (1+a^2)\bar{A}_1}{\sqrt{(a\bar{d}+b)^2 + (\bar{H} - \bar{h})^2 + (1+a^2)}} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\bar{B}_1 - \bar{d}}{\sqrt{\bar{B}_2^2 + (\bar{B}_1 - \bar{d})^2}} \left[\operatorname{Arctg} \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\sqrt{\bar{B}_2^2 + (\bar{B}_1 - \bar{d})^2}} + \operatorname{Arctg} \frac{\bar{h}}{\sqrt{\bar{B}_2^2 + (\bar{B}_1 - \bar{d})^2}} \right] \\
 & + \frac{\bar{A}_1 - \bar{d}}{\sqrt{\bar{A}_2^2 + (\bar{A}_1 - \bar{d})^2}} \left[\operatorname{Arctg} \frac{\bar{h}}{\sqrt{\bar{A}_2^2 + (\bar{A}_1 - \bar{d})^2}} + \operatorname{Arctg} \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\sqrt{\bar{A}_2^2 + (\bar{A}_1 - \bar{d})^2}} \right] \quad (15-II)
 \end{aligned}$$

où a et b sont les coefficients de la droite AB dans le plan x o y.

A-II.8 Cas de deux rectangles ayant deux côtés verticaux, dont les plans forment un dièdre d'angle α et, entre lesquels est interposé un demi-plan obstacle d'arête verticale

On supposera qu'un côté du rectangle S_2 appartient au plan x o y ; de plus, le demi-plan obstacle est parallèle à S_1 . La figure 11.II indique la répartition géométrique des paramètres.



- FIGURE 11-II -

Le demi-plan obstacle à arête verticale peut être disposé de deux manières :

- tout point lui appartenant est tel que son abscisse soit supérieure à celle de G,
- les points du demi-plan ont des abscisses inférieures à celles de G.

Pour plus de simplicité, nous dirons que l'obstacle est à droite dans le premier cas, et à gauche dans le second.

Le cheminement des calculs dans le cas d'un obstacle à droite est décrit ci-dessous.

Dans le plan $x o y$, fixons $\bar{K}$ abscisse réduite du point courant caractéristique de dS_1 . Soient $\bar{C}_{4,1}$ et $\bar{D}_{4,1}$ les abscisses réduites des intersections de KC et KD avec la droite parallèle à ox , passant par G (fig. 11-II.b).

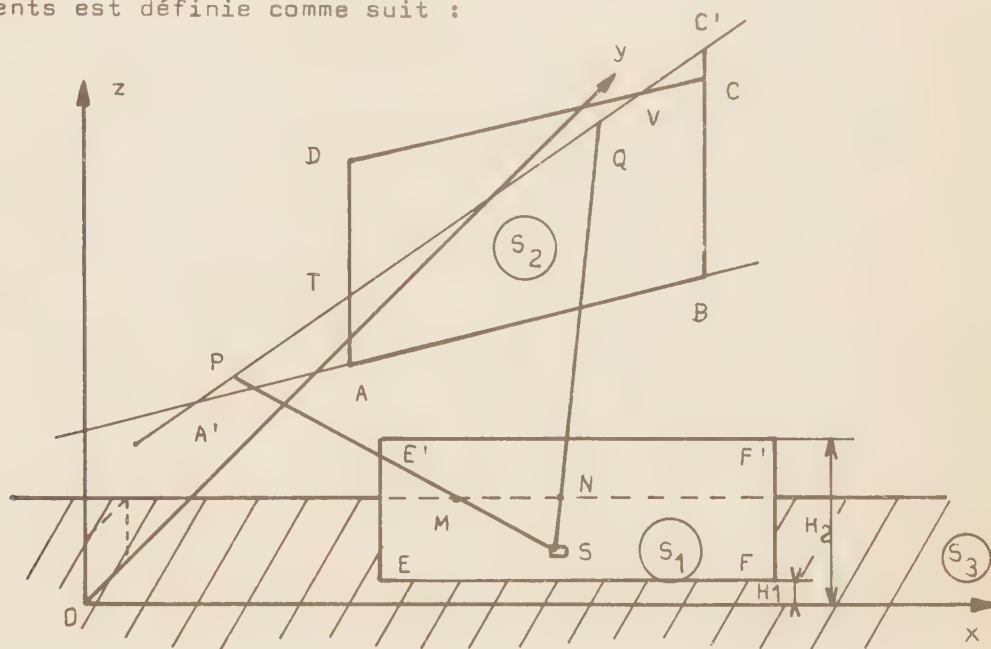
Quatre cas peuvent se présenter :

- $\bar{C}_{4,1}$ et $\bar{D}_{4,1}$ sont inférieurs à $\bar{G}_1$, abscisse réduite de G, alors le facteur d'angle est déterminé entre dS_1 et S_2 ,
- $\bar{C}_{4,1}$ est inférieur à $\bar{G}_1$, mais $\bar{D}_{4,1}$ est supérieur à $\bar{G}_1$; dans ce cas la surface S_2 devient $CD_3 D_3' C'$; où D_3 est l'intersection de KG avec CD et D_3' celle de la verticale issue de D_3 avec $C'D'$,
- $\bar{C}_{4,1}$ est supérieur à $\bar{G}_1$, et $\bar{D}_{4,1}$ est inférieur à $\bar{G}_1$; alors le facteur de vue est déterminé entre dS_1 et $D D_3 D_3' D'$,
- $\bar{C}_{4,1}$ et $\bar{D}_{4,1}$ sont supérieurs à $\bar{G}_1$, F_{d1-2} est nul. En effet, aucun point de S_2 ne peut être "vu" depuis dS_1 .

La sommation des valeurs de F_{d1-2} relatives à chaque élément de S_1 , permet d'obtenir la valeur globale du facteur de vue de S_2 , depuis S_1 , en tenant compte de S_3 .

A-II.9 Cas de deux rectangles ayant une arête verticale, dont les plans forment un dièdre d'angle α , entre lesquels est interposé un demi-plan obstacle à arête horizontale

Le problème se limitera au cas où le demi-plan obstacle est parallèle à x ou z . La disposition géométrique des différents éléments est définie comme suit :



- FIGURE 12-II -

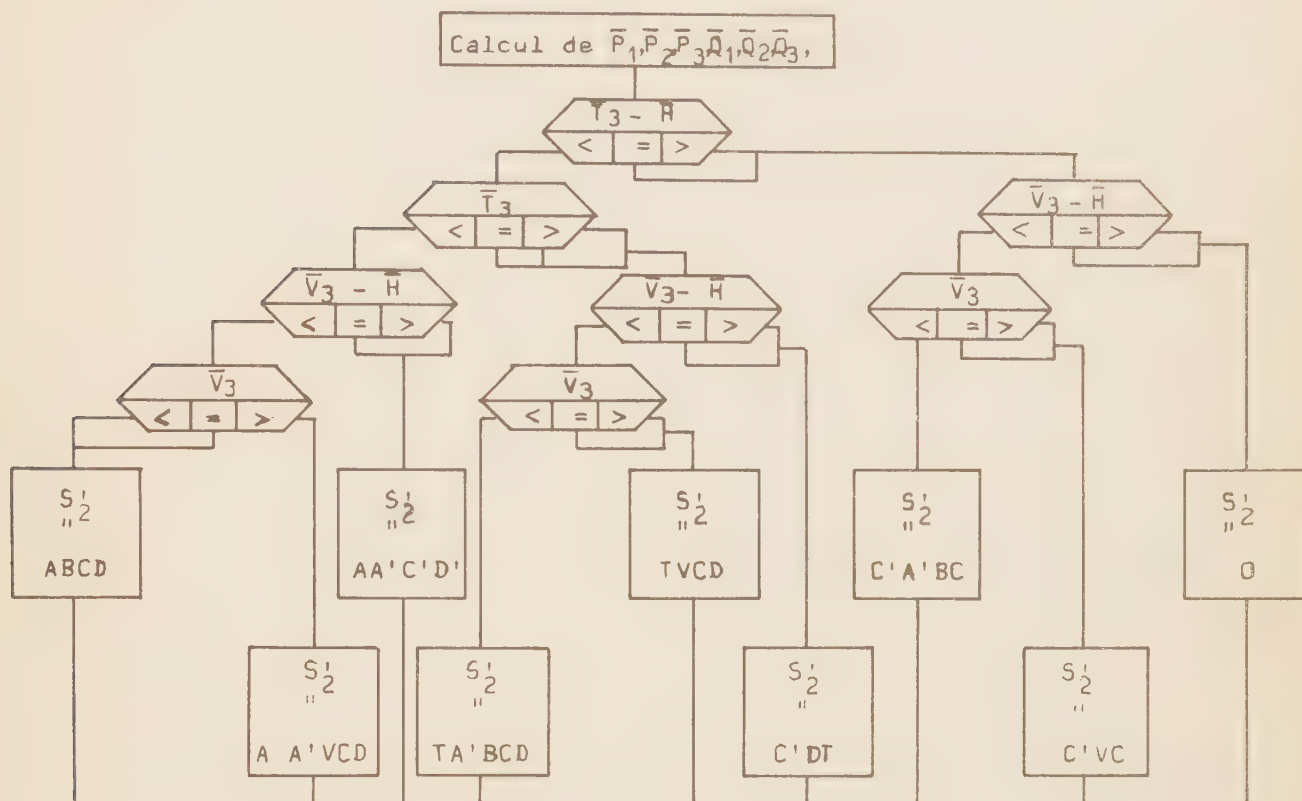
- $\bar{E}$, $\bar{F}$, $\bar{H}_1$, $\bar{H}_2$ caractérisent la surface S_1 ,
- les sommets de la surface S_2 sont A, B, C, D,
- $\bar{D}_1$ et $\bar{H}_3$ sont les coordonnées réduites de l'intersection de l'arête du demi-plan obstacle avec y ou z .

On utilisera le même procédé de calcul que précédemment : discrétisation, d'abord suivant x , puis suivant y .

Soient S le point courant de S_1 , M et N deux points arbitraires de la limite de S_3 ; $\bar{P}_1$, $\bar{P}_2$, $\bar{P}_3$; $\bar{Q}_1$, $\bar{Q}_2$ et $\bar{Q}_3$ sont les coordonnées réduites des intersections de SM et SN avec le plan de S_2 . La droite PQ est donc l'intersection des plans SMN et ABCD.

Les points T et V correspondent à l'intersection de PQ, respectivement avec AD et BC. Déterminons ensuite qu'elle est la partie

S_2' de la surface S_2 qui est vue depuis S , compte tenu du demi-plan obstacle. L'organigramme correspondant est le suivant :

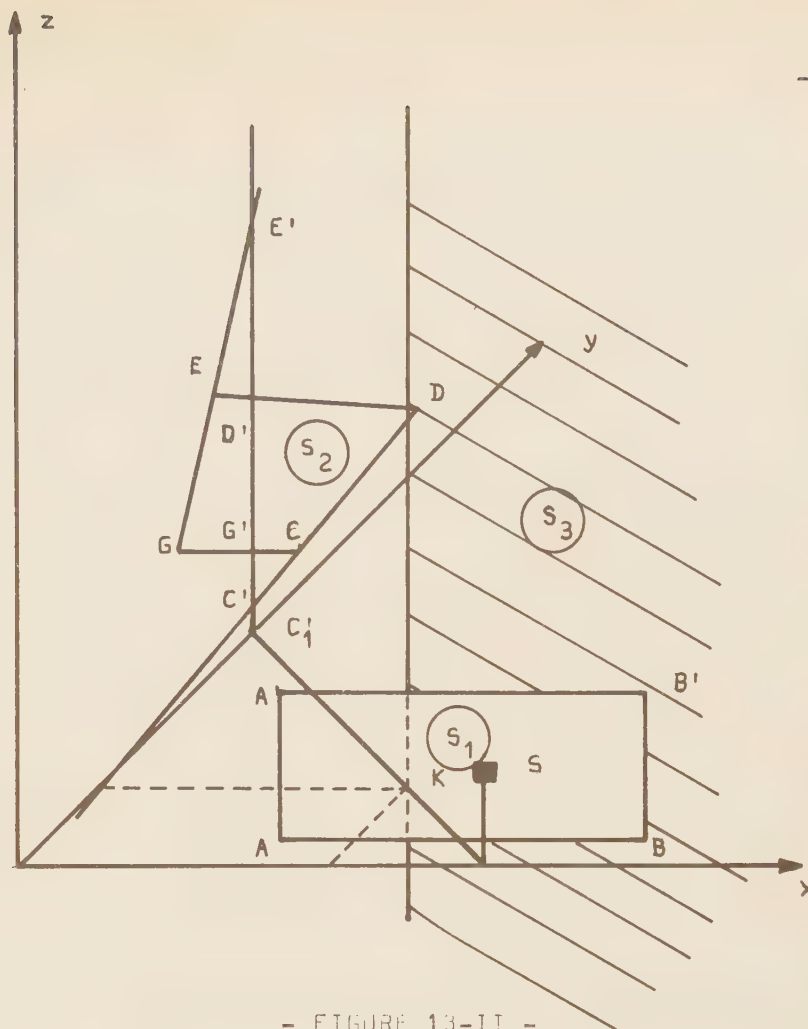


La sommation des valeurs de F_{d1-2} permet d'obtenir F_{1-2} .

A-II.10 Facteur de vue d'une surface plane S_2 , depuis une surface rectangulaire S_1 , perpendiculaire à S_2 , entre lesquelles est interposé un demi-plan obstacle à arête verticale S_3 .

Il s'agit d'un cas de figure plus général qu'en A-II.4. Cependant, on se limite au cas où S_2 est, soit quadrilatérale convexe, soit triangulaire.

Comme dans les cas précédents, nous procéderons par discrétisation. Les différents paramètres qui interviennent sont définis à la figure 13.II :



- FIGURE 13-II -

- A, B, B', A' sommets de S_1 ,
- C, D, E, G sommets de S_2 , dans le cas où cette surface est un quadrilatère,
- $\bar{K}_1$ et $\bar{K}_2$ coordonnées réduites dans x o y de la limite du demi-plan obstacle.

Soit S le point courant de S_1 , en l'absence de S_3 , on aurait :

$$2\pi F_{d1} - 2 = \oint_{C_2} \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\bar{r}^2} d\bar{z}_2.$$

Le contour C_2 étant formé de segments de droites, il est nécessaire de déterminer la valeur de cette intégrale sur un segment α de y o z :

$$I = \oint_{\alpha} \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + (\bar{y}_2 - \bar{y}_1)^2 (\bar{z}_2 - \bar{z}_1)^2} d\bar{z}_2 \quad (16-II)$$

Si $\bar{D}$ et $\bar{h}$ sont les coordonnées réduites dans x o z de S , (16-II) s'écrit :

$$I = \int_{\alpha}^{\rho} \frac{\bar{D}}{\bar{D}^2 + (a' \bar{z}_2 + b')^2 + (\bar{z}_2 - \bar{h})^2} d\bar{z}_2 \quad (17-II)$$

a' et b' étant les coefficients de la droite $\alpha\rho$ dans y o z .

Il est facile de vérifier que si

$$\begin{aligned} \eta &= 1 + a'^2, \\ x &= 2(a'b' - \bar{h}), \\ \gamma &= \bar{D}^2 + b'^2 + \bar{h}^2, \\ \Delta &= 4\eta\gamma - x^2, \end{aligned} \quad (18-II)$$

La solution est donnée par :

$$I = \frac{2\bar{D}}{\sqrt{\Delta}} \left[\text{Arctg} \frac{x + 2\eta\rho}{\sqrt{\Delta}} - \text{Arctg} \frac{x + 2\eta\alpha}{\sqrt{\Delta}} \right]$$

si Δ est positif,

$$I = \frac{\bar{D}}{\sqrt{-\Delta}} \left[\text{Log} \frac{x + 2\eta\rho - \sqrt{-\Delta}}{x + 2\eta\rho + \sqrt{-\Delta}} - \text{Log} \frac{x + 2\eta\alpha - \sqrt{-\Delta}}{x + 2\eta\alpha + \sqrt{-\Delta}} \right]$$

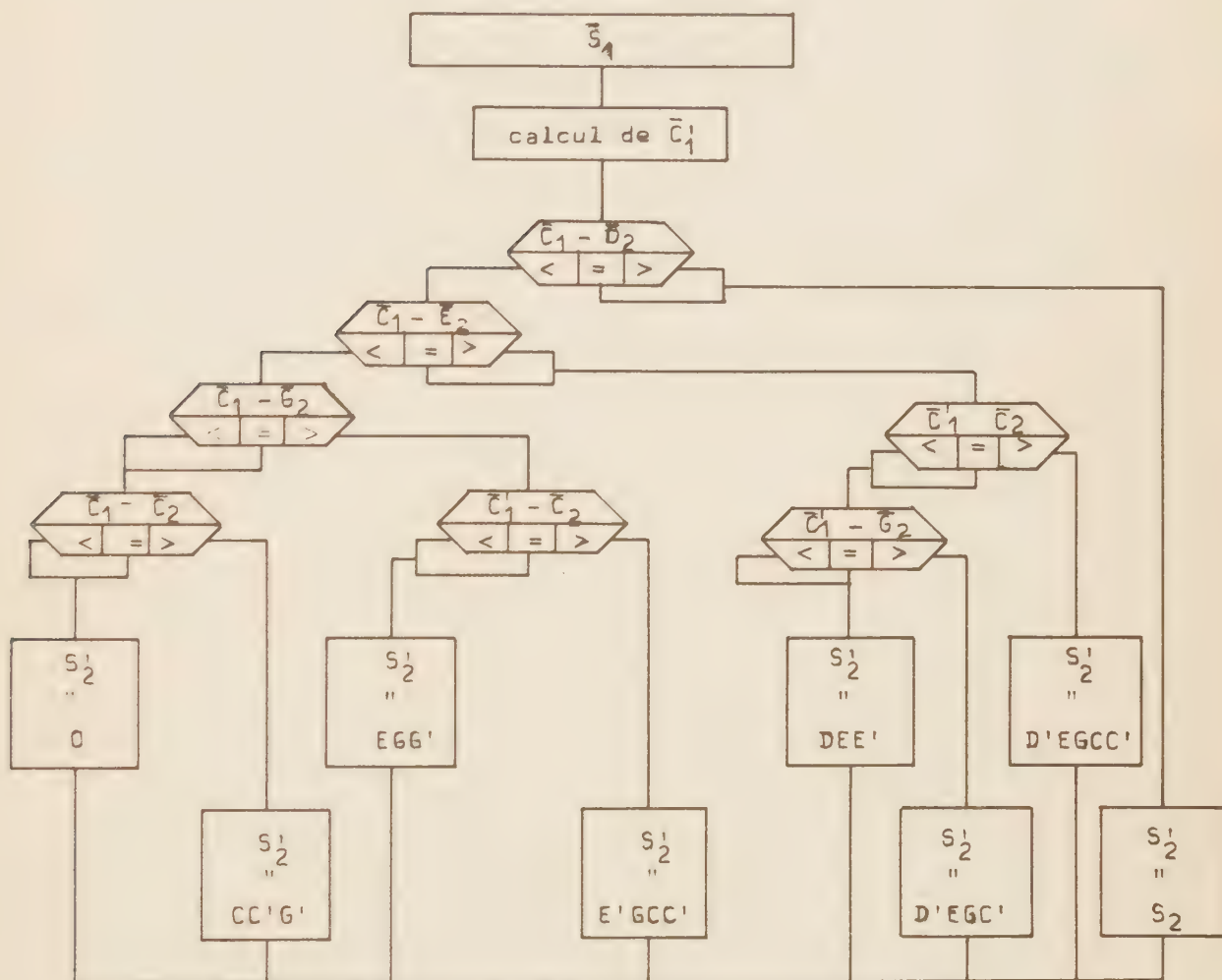
lorsque Δ est négatif,

$$I = \frac{-2\bar{D}}{x + 2\eta\rho} + \frac{2\bar{D}}{x + 2\eta\alpha} \quad \text{si } \Delta \text{ est nul.} \quad (19-II)$$

La valeur de F_{d1-2} sera obtenue en faisant la somme de trois, quatre ou cinq intégrales de ce type, suivant que S_2 est triangulaire, quadrilatérale ou pentagonale.

Pour calculer F_{d1-2} , fixons S point courant de S_1 . Soit C_1' l'intersection de $S_1'K$ avec l'axe $o y$ (S_1' est la projection de S sur ox) ; la verticale issue de C_1' correspond à l'intersection du plan formé par S et l'arête du demi-plan obstacle, avec y o z .

Il est aisé de déterminer la partie S'_2 de S_2 , depuis laquelle on voit dS_1 , l'organigramme suivant correspond à cette détermination.



La valeur de F_{1-2} est obtenue en faisant la somme des éléments F_{d1-2} de la même manière que dans le cas précédent.

A-II.11 Convergence des méthodes discrètes

La convergence des méthodes de discrétisation est étudiée dans les cas particuliers où il est possible de comparer les résultats à ceux de HAMILTON et MORGAN [28].

Les méthodes de discrétisation employées ci-dessus convergent dans les conditions suivantes :

- pour des éléments réduits $d\bar{S}_1$ inférieurs ou égaux à $0,02 \times 0,02$, les résultats sont stables,

- cependant pour des valeurs de l'ordre de $0,04 \times 0,04$, les résultats obtenus sont relativement proches de ceux obtenus pour des éléments $d\bar{S}_1$ égaux à $0,02 \times 0,02$.

Dans toutes les applications qui suivent, nous avons fait en sorte que $d\bar{S}_1$ soit de l'ordre de $0,04 \times 0,04$.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.W. THRING - M.P. NEWBY. - Combustion length of enclosed turbulent jet flames - Fourth symposium on combustion. The Williams and Wilkins Compagny, 1953, p. 789-796.
- [2] J. GOSSE. - Cours du Certificat de Mécanique des milieux continus. Faculté des Sciences de Nancy.
- [3] G. TISSANDIER. - Cold aerodynamic trials on a fifth scale model of the Ijmuiden pulverized-fuel, furnace - Journal of the Institute of fuel, 1966, p. 377-385.
- [4] G.G. THYLOW. - Similarity criteria for the Study of furnace flames by means of cold models.
- [5] F. FITZGERALD- A.D. ROBERTSON. - Isothermal fluid modelling of steel-making plant. Third Symposium on flames and Industry 1966, LONDRES.
- [6] A.D. ROBERTSON. - Modification of the Thring-Newby criterion for problems where flow pattern and mixing are equally important. Journal of the Institute of fuel, Nov. 1965, p. 481-482 .
- [7] D. ANSON. - Modelling experience with large Boilers. Third Symposium on flames and Industry - 19th October 1966, LONDRES
- [8] J.M. BEER. - The Significance of Modelling. Third Symposium on flames and Industry, October 1966, LONDRES.
- [9] BARCHILLON-CURTET. - Structure détaillée d'un jet en présence de recirculation. 5ème journée d'Etude sur les flammes, Nov, 1963.
- [10] P.D. SUNAVALA - C. HULSE. - M.W. THRING. - Combustion and Flame, 1957, 1, 179.
- [11] D. ANSON. - Derivation of furnace heat transfer from fluid dynamic behaviour. Thermodynamic and fluid mechanics convention. Liverpool April 1966.

- [12] L. GUNTHER. - Untersuchungen an turbulenten Strahlflammen. Gaswärme n° 8. Août 1966, p. 247-253.
- [13] H. BOENECKE. - Application of flow research to industrial furnaces with particular emphasis on soaking pits. Journal of the iron and steel institute. April 1961, p. 283-295.
- [14] H. BOENECKE. - Conception et développement constructif des fours d'industrie à l'aide des essais sur maquette. Gaswärme n° 8, Août 1966, p. 253-264.
- [15] R. COLLIN. - Transmission calorifique et écoulement des gaz dans les fours pits. Jernkontorets Annaler 1962, 146, n° 11, p. 842-861.
- [16] R. CURTET - A. CRAYA. - Sur l'écoulement d'un jet entre parois. Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air. 1960.
- [17] M. BAUDIN - M. ROSIER. - Etude des relations entre les paramètres brûleurs, la forme des flammes et la forme de la chambre de combustion. Applications à un four poussant. 7ème journées d'Etude sur les flammes, PARIS, Avril 1968.
- [18] C. MAEDER. - Contribution à l'étude du développement d'une flamme et à l'écoulement des fumées à l'intérieur d'un four Pit. ENSEM 1969.
- [19] ROBERTSON - PENGELLY - CHESTER. - Flow Pattern of the U-Fired soaking pit. Rapport United. Stell-Co-5123/3/63.
- [20] R. COURDILLE. - Les fours Pit - Evolution dans la construction et conditions de chauffage - Revue de Métallurgie 1968, p. 493-502.
- [21] J.H. CHESTER. - Flow pattern in furnaces - part. 1 - part. 2 - Steel times 1965, p. 168-174 et p. 206-211.
- [22] J. CHEDAILLE - W. LEUKEL - A.K. CHESTER. - Aerodynamic studies carried out on turbulent jets by the International Flame Research Foundation. Third symposium on flames and Industry 1966, LONDRES.

- [23] C. ELBAZ. - Echange d'énergie radiante entre surfaces diffusantes. C.N.E.S. - Note Technique n° 3, Février 1966.
- [24] H.C. HOTTEL. - Transmission de la chaleur par rayonnement dans Transmission de la Chaleur par Mac ADAMS - p. 62-139, Dunod 1961.
- [25] H.C. HOTTEL - E.S. COHEN - C.A. HOMSY. - Radiant heat exchange in a gaz filled enclosure. One day symposium on flames and Industry 9th October 1957.
- [26] H.C. HOTTEL - A.F. SAROFIM. - The effect of gaz flow patterns on radiative transfer in cylindrical furnace. International Journal of Heat-Mass Transfer. Vol. 8, p. 1153-1169.
- [27] H.C. HOTTEL - A.F. SAROFIM. - Radiative transfer. Mac Graw Hill 1967.
- [28] D.C. HAMILTON - W.R. MORGAN. - Radiant interchange configuration factors N.A.C.A. Technical Note 2836.
- [29] E.M. SPARROW. - A new and simpler formulation for radiative angle factors. Journal of Heat Transfer, Mai 1963, p. 81-88.
- [30] J.A. WIEBELT. - Engineering Radiation Heat Transfer - Holt, Rinehart et Winston - New-York 1966, p. 95-125.
- [31] G. RIBAUD - E. BRUN. - Le rayonnement thermique - J. et R. Sennal, PARIS 1948.
- [32] R. LOISON. - Modèles mathématiques de flamme. 7ème journée d'Etude sur les flammes, PARIS 1968.

NOM DE L'ETUDIANT : MAEDER Claude

Nature de la thèse: DOCTEUR-INGENIEUR

Vu, Approuvé

et Permis d'imprimer

NANCY, le 27 Novembre 1969

Le Doyen,



A handwritten signature in dark ink, consisting of a large, stylized 'J' followed by a horizontal line and a smaller, cursive-like flourish.

J. AUBRY

Achevé d'imprimer le 28 Novembre 1969
au Service de Documentation du
Laboratoire de Mécanique de
L' E. N. S. E. M.
2, Rue de la Citadelle - NANCY

Dépot légal n° 1969 - Faculté des Sciences, Editeur
4ème trimestre 1969

